

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Obor : Výrobní systémy

Zaměření : Pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu

**VLIV RŮZNÝCH NASTAVENÍ TISKU NA MECHANICKÉ
VLASTNOSTI PROTOTYPOVÝCH DÍLŮ**

**INFLUENCE OF DIFFERENT PRINT SETTINGS ON THE
MECHANICAL PROPERTIES PROTOTYPE PARTS**

KVS - VS - 225

Irina Elkina

Vedoucí práce : Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Počet stran : 58
Počet příloh : 2
Počet obrázků : 30
Počet tabulek : 8
Počet modelů
nebo jiných příloh : 0

V Liberci 25.05.2012

**TÉMA : VLV RŮZNÝCH NASTAVENÍ TISKU NA
MECHANICKÉ VLASTNOSTI PROTOTYPOVÝCH DÍLŮ**

Diplomová práce seznamuje s jednou z metod výroby prototypů Rapid Prototyping, tak zvanou metodou 3D tisku na dvou různých typů zařízení. Práce je zaměřena na porovnání mechanických vlastností vytištěných prototypových dílů podle různých nastavení parametrů tisku a také vliv následných operací (temperace, stárnutí) na vytištěných dílech.

**THEME : INFLUENCE OF DIFFERENT PRINT SETTINGS ON
THE MECHANICAL PROPERTIES PROTOTYPE PARTS**

The object of this diploma work is an explanation of one approach, known as 3D printing, to produce prototypes Rapid Prototyping with two different production equipments. The work is focused on comparing mechanical properties of printed models, according to different settings of the print and an influence of subsequent operations (warming, ageing) on the printed models.

Desetinné třídění :

**Klíčová slova : RAPID PROTOTYPING, 3D TISK, FDM, POLYJET MATRIX,
MECHANICKÉ ZKOUŠKY**

**Key words : RAPID PROTOTYPING, PROTOTYPE, 3D PRINTING, FDM,
POLYJET MATRIX, MECHANICAL TESTS**

Zpracovatel : TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

Dokončeno : 2012

Archivní označení zprávy :

Počet stran : 58

Počet příloh : 2

Počet obrázků : 30

Počet tabulek : 8

Počet modelů

nebo jiných příloh : 0

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Petru Zelenému Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Jiřímu Šafkovi za jeho pomoc a rady při realizaci výroby v praktické části. Děkuji také Ing. Martinu Seidlovi za jeho ochotu a vstřícnost při provedení tahových zkoušek, s kterým jsem spolupracovala při vypracování praktické části této práce.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vznik tohoto materiálu byl podpořen v rámci projektu OP VK (CZ 1.07/2.2.00/07.0291) „In-TECH 2“ spolufinancovaného Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem ČR.

Realizace projektu : 2009 – 2012.

Partneři projektu: Technická univerzita v Liberci - Škoda Auto a.s. - Denso MCZ s.r.o.

Manažer projektu Doc. Dr. Ing. Ivan Mašín.



Realizace této práce byla podpořena projektem studentské grantové soutěže TUL Komplexní optimalizace výrobních systémů a procesů (interní číslo projektu 2821) v rámci specifického vysokoškolského výzkumu.

OBSAH

Seznam zkratk a symbolů	8
1. Úvod.....	9
2. Cíle práce.....	12
3. Základní přehled	13
3.1. Co to je Rapid Prototyping.....	13
3.2. Princip technologií Rapid Prototyping	13
3.3. Základní postup Rapid Prototyping	14
3.3.1. Preprocessing.....	15
3.3.2. Processing.....	17
3.3.3. Postprocessing	17
3.4. Metody Rapid Prototyping dostupné na KVS.....	18
3.4.1. Fused Deposition Modeling (FDM)	18
3.4.2. PolyJet 3D Printing Technology – PolyJet Matrix.....	20
4. Mechanické vlastnosti materiálů a jejich zkoušení	24
5. Norma trhání	27
6. Cíle experimentu	30
6.1. 3D CAD model zkušební tyče	31
6.2. STL formát.....	31
6.3. Příprava dat pro tisk	31
6.3.1. Technologický postup výroby na 3D tiskárně Dimension SST 768 ...	33
6.3.2. Technologický postup výroby na 3D tiskárně Connex 500.....	38
6.4. Proces temperaci	41
6.4.1. Postup temperace 1.....	42
6.4.2. Postup temperace 2.....	43
6.5. Proces stárnutí	44
7. Tahová zkouška	44
Zhodnocení výsledků	51
Závěr	53
Seznam použité literatury	54
Seznam obrázků	57

Seznam tabulek.....	58
Seznam grafů	58
Seznam příloh	58

Seznam zkratk a symbolů:

2D - Two Dimension

3DP - Three-dimensional printing

ABS - Akrylnitril-Butadien-Styrol

CAD - Computer Aided Design

FDM - Fused Deposition Modeling

HDT - teplota tvarové stability

KST - katedra strojírenské technologie

KVS - katedra výrobních systémů

LOM - Laminated Object Manufacturing

LS - Selective Laser Sintering

MKP - metody konečných prvků

NC - Numerical Control

PCB - postavení prototypových desek plošných spojů

UV - Ultrafialové světlo

RP - Rapid Prototyping

RE - Reverse Engineering

SL - Stereolitografie

STL - Stereolithography file

1. ÚVOD

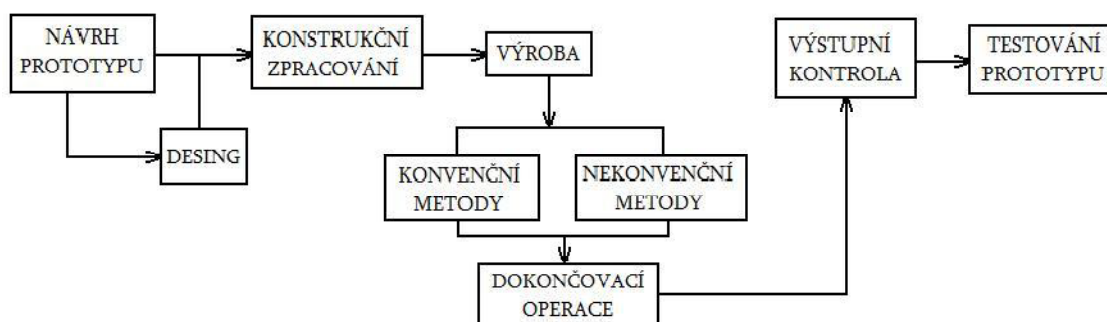
Prototyp (z řeckého prótos, první, a typos, ražba) je důležitou a nezbytnou částí procesu vývoje výrobku. Podle Oxfordského slovníku současné angličtiny pro pokročilé, je označení pro prototyp popsáno jako první nebo originální příkladný exemplář něčeho, co bylo nebo bude kopírované nebo vytvořené, je zmenšeným modelem nebo předběžnou verzí předmětu. Je to navržená novinka, nový typ nějakého průmyslového výrobku. [10], [12]

Však v návrhářství to často více chápou, než jen jako umělý výrobek. Často prototyp se překládá jako vytváření designu motoru pro technické účely nebo postavení prototypových desek plošných spojů (PCB).

Aby bylo možné pojmut všechny různé značení slova prototyp, používané v designu, lze krátce definovat jako: *Aproximace výrobku (nebo systému) nebo jeho složek v nějaké formě pro určitý účel v jeho implementaci.*

To zahrnuje všechny druhy prototypů používané v procesu vývoje výrobku, včetně objektů, jako jsou matematické modely, skici, pěnové modely a funkčně hmotná aproximace nebo přesné kopie výrobků. [10]

Samozřejmě výroba funkčního prototypu je náročná, plus k tomu ještě nejsou k dispozici výrobní nástroje pro hromadnou výrobu prototypů, a proto se musí vyrábět ručně v několika kusech. [12]



Obr. 1.1 Schéma postupu výroby prototypu [12]

Ted' kdy soutěž v globální ekonomice dosáhla tak vysoké úrovně, že spotřebitelé začali doslova diktovat podmínky pro výrobce, takové věci jako jsou auta a hodinky přestaly se prodávat po milionech. Nyní optimální dávkou je několik tisíc kusů. Proto výroba prototypů, vzorků, šablon a forem pro výrobu konečného dílu se stává drahou. V tuto dobu se začíná vývoj zařízení pro výrobu prototypů. Část strojů zůstala ve výrobním sektoru, ale vývoj přivedl druhou část ke kancelářským tiskárnám pevných objektů (Three Dimensional Printer nebo 3D printer). Účelem těchto zařízení je rychlá výroba vzorků, což umožňuje vidět, jak to bude vypadat.

Jakmile máme fyzický model budoucího výrobku, můžeme identifikovat a odstranit různé nedostatky a opravit chybné procesy. Protože je často obtížné odhalit chyby a nedostatky pouze pomocí obrazovky počítače. Navíc ne všichni jsou schopni snadno se orientovat v trojrozměrných projekcích, v pracovním procesu na nějakém závažném architektonickém nebo inženýrském projektu.

RP-systém znamenal revoluci v technologii po předchozích metodách výroby prototypů, které existovaly až do poloviny 80. let. Namísto čekání zhotovení modelu po několik týdnů, nyní návrháři mohou je získat za pár hodin či dokonce minut pomocí 3D tisku, při kterém se staví fyzické modely z přístupného materiálu pomocí jedné či více inkoustových hlav jak to je u běžných tiskáren. Stejně jako tradiční RP-stroje, 3D tiskárny vytváří dle virtuálního modelu reálný, využívají zejména technologie tryskového modelování (voskové hmoty) a technologie, která tvaruje díl z prášku, který tvrdne s pojivem. [9], [8], [11]

Takový způsob výroby prototypu má uplatnění v různých oblastech, například v automobilovém a leteckém průmyslu, strojírenství, designu a lékařství.

Hlavní důvody pro tvorbu prototypu:

- objevení chyb a nepřesností ve výrobní dokumentaci (nesprávnosti návrháře),
- objevení nesprávnosti v koncepci (chyby realizačního týmu),
- potvrzení možnosti vyrobit a smontovat navržený model,
- ohodnocení vzezření – jasná představa vnějšího tvaru objektu zákazníkem,
- potvrzení vhodnosti pro sériovou výrobu.

Tvorba prototypu může být uskutečněna způsobem:

- tradičním – aditivním, substraktivním a kompresivním,
- moderním – Rapid Prototyping (generativním).

V současné době se obě tyto technologie používají dohromady. [18]

2. Cíle práce

Cílem diplomové práce je seznámení se s 3D tiskem, což je jednou z metod RP pro vytváření prototypových dílů. V teoretické části popsat charakteristiky zařízení, dostupných v laboratorích katedry výrobních systémů (FDM - Dimension SST 768 a PolyJet Matrix - Connex 500). Na základě teoretických znalostí problematiky vyzkoušet vybranou metodu za pomoci dvou uvedených různých typů zařízení. Dle normativu navrhnout tvar a velikost testovacího dílce, pak navrhnout způsob testování dílu. Po vytištění sady dílů při různém nastavení parametrů tisku zjistit pomocí provádění samotných měření mechanických vlastností (mez pevnosti, tažnost), zda má různé nastavení tisku vliv na výsledné mechanické vlastnosti vytištěných prototypových dílů. Vystavit část vzorků temperaci a část nechat stárnout, pak zjistit vliv následných operací (procesu stárnutí, temperace) na vytištěné díly pomocí mechanických zkoušek a provést jejich vyhodnocení a uvést výsledky v praktické části diplomové práce. Dospět k závěru o výsledcích provedené práce.

3. Základní přehled

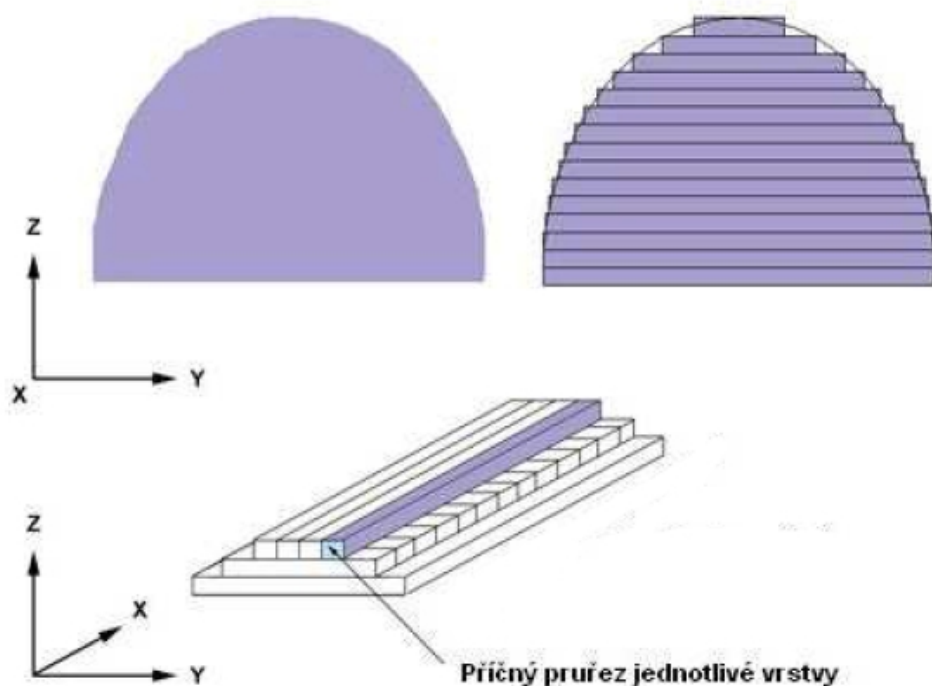
3.1. Co to je Rapid Prototyping

Pod Rapid Prototyping se rozumí celá řada technologií, pomocí kterých se rychle vytváří fyzické modely, prototypy a části nebo komponenty nástrojů přímo na základě 3D dat, které mohou být získané z různých 3D softwarů (například ProEngineer, Inventor, Catia, SolidWorks, Rhinoceros, atd.), určených pro konstrukční a návrhové procesy. Jiná možnost získat 3D data je pomocí různých metod reverzního inženýrství (RE), což je vynález úplně stejně nebo podobně fungujícího předmětu naskenováním bodu, které jsou pak zpracovány v CAD programech, ale to nemusí být určitou kopií originálu. [14], [15]

3.2. Princip technologií Rapid Prototyping

Rapid Prototyping je proces automatického vytváření fyzických objektů pomocí tzv. generativní (nebo aditivní) výrobní technologie. Tato technologie se liší od subtraktivních výrobních procesů nebo tvořících procesů, jako jsou soustružení, frézování, broušení nebo řezání atd., ve kterých tvar nějakého výrobku je formován odebráním materiálu nebo plastickou deformací. Naopak tomu je materiál při metodách RP postupně přidáván. Ve všech komerčních procesech RP prototyp se vyrábí nanášením vrstev, tvarovaných v rovině X-Y dvou rozměrově. Třetí rozměr Z je výsledkem jednotlivých vrstev, naskládaných na sebe, ale ne jako souvislá Z-souřadnice. Proto prototypy jsou velmi přesné v rovině X-Y, ale ve směru Z mají schodečkový efekt. Pokud model je složen z velmi jemných vrstev, tj. menšími kroky ve směru Z, model vypadá jako originál. RP může být rozdělený do dvou zásadních procesních kroků a to vytváření matematické informace o vrstvách a vytváření fyzického modelu po vrstvách.

Pomocí počítačových programů se virtuální tvar modelu převede do jednotlivých vrstev, z kterých pak vytvoří celý požadovaný model z řady průřezů. Konečný tvar dílu, vyrobený pomocí různých technologií RP, skutečně odpovídá modelu, protože tyto vrstvy, dle modelu z CADu, podle vybrané technologie RP jsou spojené mezi sebou daným způsobem dohromady. [13], [17]



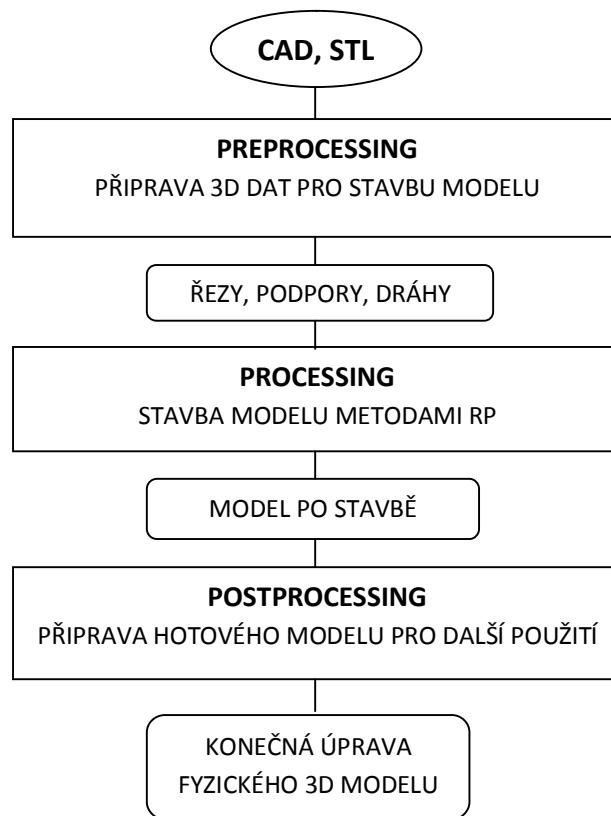
Obr. 2.1 Rozdělení modelu do jednotlivých vrstev [16]

3.3. Základní postup Rapid Prototyping

Všechny technologie RP jsou založeny na určitém postupu výroby, který je nejčastěji rozdělen do základních třech kroků:

- Preprocessing
 - tvorba modelu v libovolném programu CAD
 - převod modelu CAD do STL formátu
 - rozložení STL formátu do jednotlivých tenkých vrstev
- Processing → stavba dílu metodami RP: SL, LS, LOM, FDM, 3DP, PolyJet Matrix (vrstva po vrstvě)
- Postprocessing → další operace s modelem pro použití v dalších oblastech (odstranění podpor, povrchová úprava, barvení, vyztužení nebo naopak temperování)

Takový postup rozdělení je velmi podobný například postupům zpracování dat pro NC stroje anebo postupům při výpočtu dat analýzou metody konečných prvků (MKP). Vlastně stále jde o přípravu dat, zpracování a zhodnocení výsledků. [1], [3]



Obr. 2.2 Postup při výrobě modelu [1]

3.3.1. Preprocessing

Preprocessing je první a důležitá etapa výroby modelu pomocí RP a řadíme do ní všechny přípravné kroky před vlastní výrobou. Na začátku, ještě při přípravě výroby pomocí strojírenských CAD programu se tvoří digitální 3D model, který pak musí být převedeny do tzv. formátu STL (Stereolithography file), který dnes podporuje většina známých CAD softwarů. STL formát je univerzálním pro všechny technologie RP. Převod CAD dat do formátu STL je nejjednodušší a nejkratší část celého postupu výroby. Formát STL zobrazuje jenom povrchovou síť trojrozměrného objektu pomocí velkého počtu trojúhelníků spojených mezi sebou. Tyto trojúhelníky představují plošné prvky a nemohou vyjádřit zakřivené plochy, proto přesnost daného povrchu se

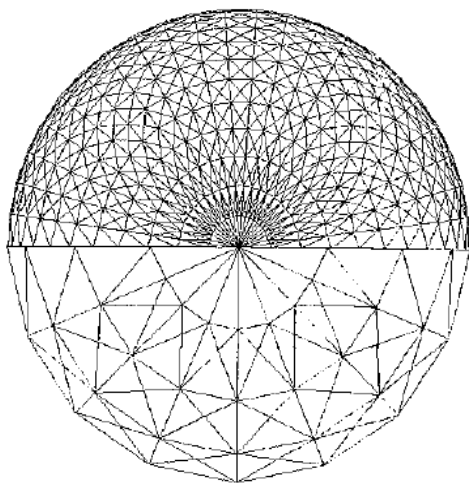
projevuje v hustotě rozmístění trojúhelníků. Čím je větší zakřivená plocha, tím je v té oblasti větší množství drobných trojúhelníčků, ale kvůli tomu je pak větší STL soubor.[13]

Po převodu 3D CAD dat do formátu STL je třeba jich dále přemístit do počítačového systému stroje RP, kde nastane určení modelového materiálu a podpor a následně i generace tenkých, horizontálních řezů obdrženého trojúhelníkového modelu na vyhovující množství vrstev s tloušťkou 0,01mm až 0,7mm, což bude dle vybrané technologie. Tyto rovinné řezy pak definují 2D obrysovou geometrii stávajícího modelu a jsou její základní vstupní informací pro systémy RP. [1], [13]

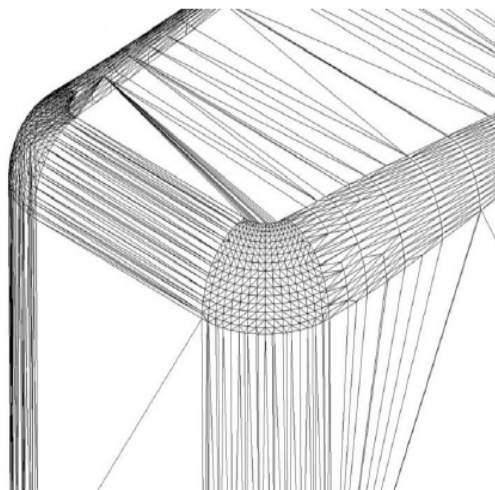
Tloušťky vrstev jsou velice malé, aby při stavbě nedošlo k jejich prasknutí, deformaci nebo zborcení, je nutné je zabezpečit, proto se používají (dle potřeby u vybrané technologie RP) podpurné konstrukce ze speciálního, odlišného, než stavební materiálu.[1]

Dále se model umístí co nejlepším způsobem do pracovního prostoru tiskárny tak, aby se dosáhlo úspory upotřebeného materiálu a nanášení vláken materiálu ve vhodném směru k následnému směru namáhání modelu.

Po ukončení těchto operací vlastně je možné přejít k výrobě modelu.



Obr. 2.3 Vliv počtu trojúhelníčku při modelování povrchu koule [13]



Obr. 2.4 STL interpolace CAD modelu [13]

3.3.2. Processing

Pod touto fází se rozumí vlastní výroba zkoumaného modelu po jednotlivých vrstvách. Stavba těchto vrstev jde použitím jednoho konkrétního principu z výše uvedených technologií RP (v daném případě dostupných FDM a PolyJet), které budou detailně prostudované v následujících částech. [13]

3.3.3. Postprocessing

Do poslední a důležité etapy výroby, co je nedílnou součástí výroby prototypu, která se označuje jako postprocessing, patří celá skupina následujících kroků:

- První co je třeba udělat je vyjmutí modelu ze stroje.
- Pak u některých metod je třeba počkat, aby model stihl ztuhnout.
- Dále se model musí očistit od okolního materiálu, buď odsáváním práškového materiálu anebo oplachem při použití fotopolymery.
- Pak se začíná odstranění podpor z pomocného materiálu, jestli takový byl vůbec použit při dané technologii, to se děje mechanickým způsobem nebo chemickým (FDM), kdy podpurný materiál se rozpustí nebo vyplaví v louhovém roztoku.
- Dále u vybraných metod (3DP, LS) následuje čištění.
- Potřebným může být i napouštění různými tužidly pro zvýšení mechanických vlastností již hotového modelu (pro porézní materiál u LS nebo 3DP).
- Také již hotové modely mohou být vystaveny následnému temperování pro zvýšení jejich mechanických vlastností (dle vlastností použitých materiálů).
- Schodečková struktura modelu (skoro vždy jsou vidět jednotlivé vrstvy na modelu) může být odstraněna další úpravou, což je povrchovou úpravou. Proces, kdy se na povrch modelu nanáší vrstva tmelu a brousí nebo leptáním. Broušení se především děje pod vodou.

Po provádění všech potřebných kroků ve fázi postprocessingu obdaříme požadovaný model s ideálním povrchem. [1], [2], [14]

3.4. Metody Rapid Prototyping dostupné na KVS

3.4.1. Fused Deposition Modeling (FDM) – nanášení roztaveného polymeru z vlákna

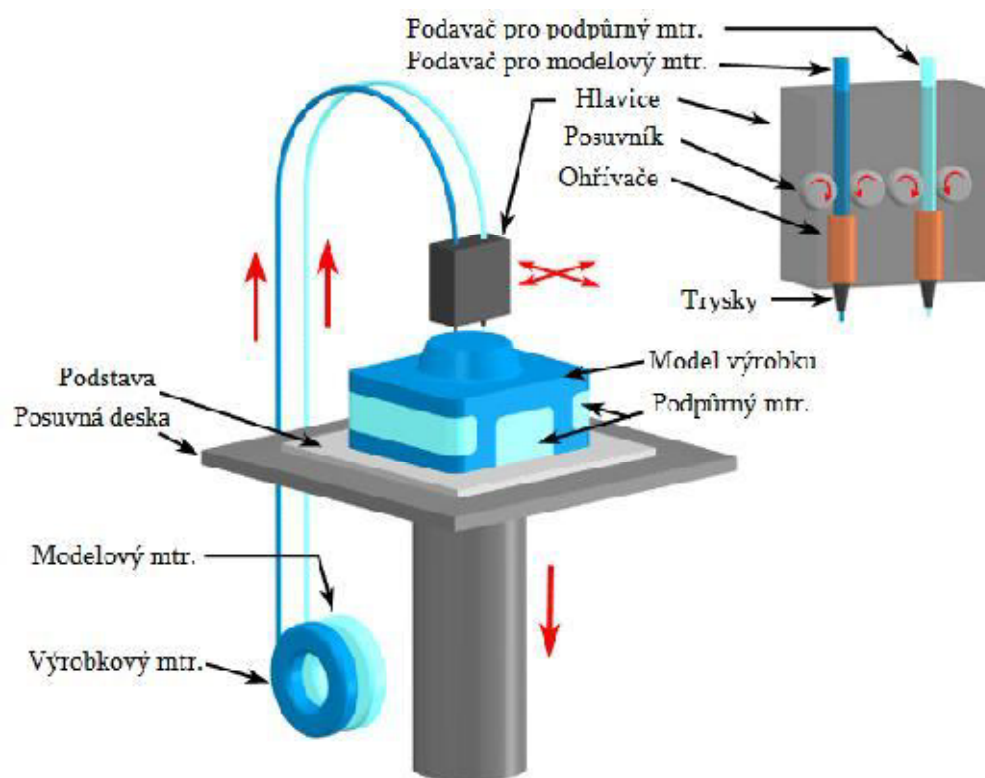
Tato metoda RP spočívá v tavení modelovacího a podpůrného materiálu z polymerových vláken, rozmístěného ve formě bloku nebo cívky v zásobníku, v trysce tiskárny a jeho postupném nanášení od základny nahoru po jednotlivých velmi tenkých vrstvách. Jako materiál lze použít různé netoxické termoplasty nebo vosky. Pro danou výrobu zkušebních těles byl použit ABS materiál, je tuhý a zároveň i pružný. Tyto polymerová vlákna se taví v tryskách, které mají teplotu o 1 °C vyšší, než je teplota tavení materiálu. Pomocí těchto trysek, které se pohybují v rovině nad pracovní deskou, se nanáší požadovaná ultratenká vrstva, která po nanesení ihned tuhne. Pracovní deska se vždy po nanesení sníží o tloušťku další vrstvy. Jedná se tedy o metodu, kdy se neužívá žádného typu laseru. Avšak nutnost podpor zde zůstává obzvláště u rozměrnějších součástí, které svými rozměry přecházejí. Daná tiskárna Dimension SST 768 díky svým rozměrům je nenáročná na pracovní prostor a relativně nehlučná. [12], [13]

Výhody:

- dobré mechanické vlastnosti prototypů;
- minimální odpad (jenom podpůrný materiál);
- podpory lze odstranit mechanickým i chemickým způsobem;
- po odstranění podpor není potřeba žádných úprav povrchu;
- nízká cena;

Nevýhody:

- nutnost stavení podpor;
- nízká přesnost (závisí na tloušťce vlákna);
- nestálost teploty vytvářené součásti. [14]



Obr. 2.5 Výroba prototypu metodou FDM [12]



Obr. 2.6 3D tiskárna Dimension SST 768

Tab. 2.1 Technické informace k 3D tiskárně Dimension SST 768 [4], [12]

Rozměry tiskárny (d x š x v)	686 mm x 914 mm x 1041 mm,
Pracovní rozsah (X x Y x Z)	203 mm x 203 mm x 305 mm
Přesnost tisku (X x Y x Z)	0,1 mm x 0,1 mm x 0,5 mm
Tloušťka vrstvy	od 0,254 mm
Použitý materiál	ABS
Formát pro zpracování dat	STL
Hmotnost tiskárny	136 kg

Tab. 2.2 Charakteristiky materiálu ABS pro tiskárnu Dimension SST 768 [5]

Tensile strength (pevnost v tahu)	5 000 psi	34,5 MPa
Tensile modulus (modul pevnosti)	360 000 psi	2 482,11 MPa
Elongation (prodloužení)	>10 %	>10 %
Flexural strength	9 500 psi	65,5 Mpa
Flexural modulus	380 000 psi	2 620 Mpa
Hardness (tvrdost)	78 D	
Softening point	200 °F	104,4 °C

3.4.2. PolyJet 3D Printing Technology – PolyJet Matrix

Tato technologie RP patří k nejnovějším, patentována Izraelskou firmou Objet Geometrie v roce 1998. Daná metoda spojuje principy laserových a tryskových metod tváření. Základem této metody je vytváření tenké vrstvy fotopolymeru pomocí trysek tiskové hlavy, které se vytvrdí lampou vydávající UV spektrvé světlo.

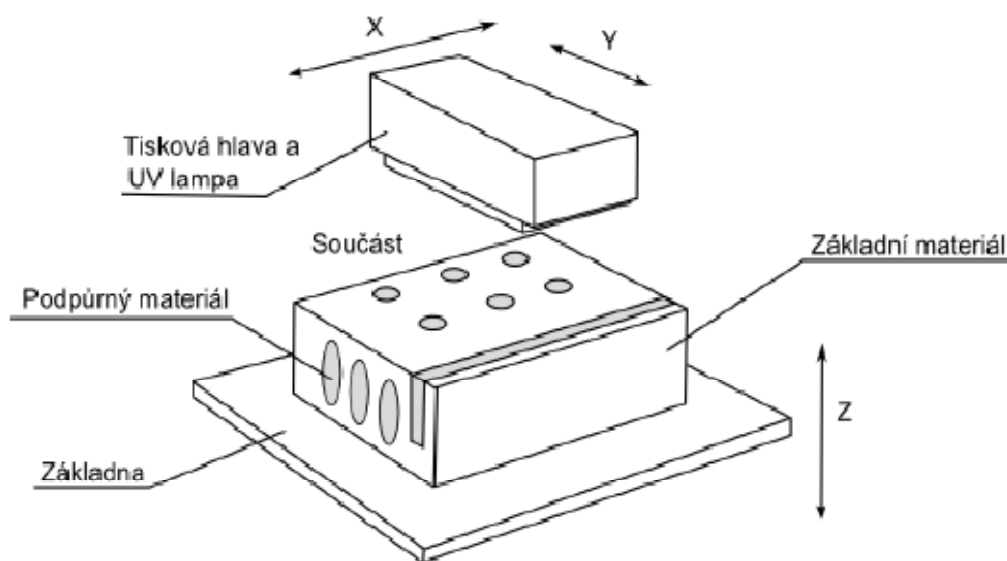
Výroba pomocí této metody spočívá v společném pohybu 8 tiskových hlav, každá z nich obsahuje 96 trysek. Tyto hlavy se pohybují horizontálně v osách X-Y nad pracovní deskou a postupně nanášejí fotocitlivý modelovací a podpurný materiál ve formě vrstvy o minimální tloušťce 16 μm . Současně se základním materiálem lze také nanášet podpurný materiál. Dalším aspektem je téměř okamžité vytvrdnutí této vrstvy při styku s už naneseným materiálem pomocí UV záření od UV lampy, která se zároveň pohybuje s tiskovými hlavami. Po nanesení jednotlivé vrstvy se pracovní deska postupně posouvá směrem dolů a nanášejí se další vrstvy do vytvoření celého modelu. Hotový model se z pracovní desky opatrně odebere a pomocí dalšího zařízení se pod tlakem vody odstraní od podpurného materiálu. Materiál může být zvolen z docela velkého výběru dle jejich vlastností.

Výhody:

- velké množství použitelného materiálu (14 typů), viz obr. 2.9;
- možnost dvoukomponentního tisku materiálů s odlišnými vlastnostmi;
- možnost tisku dvou materiálů zároveň;
- malá tloušťka vrstvy (jemný schodečkový efekt);

Nevýhody:

- potřebnost podpor při stavbě;
- nutnost dalšího zařízení pro očištění modelu. [20]



Obr. 2.7 Princip technologie PolyJet Printing [20]

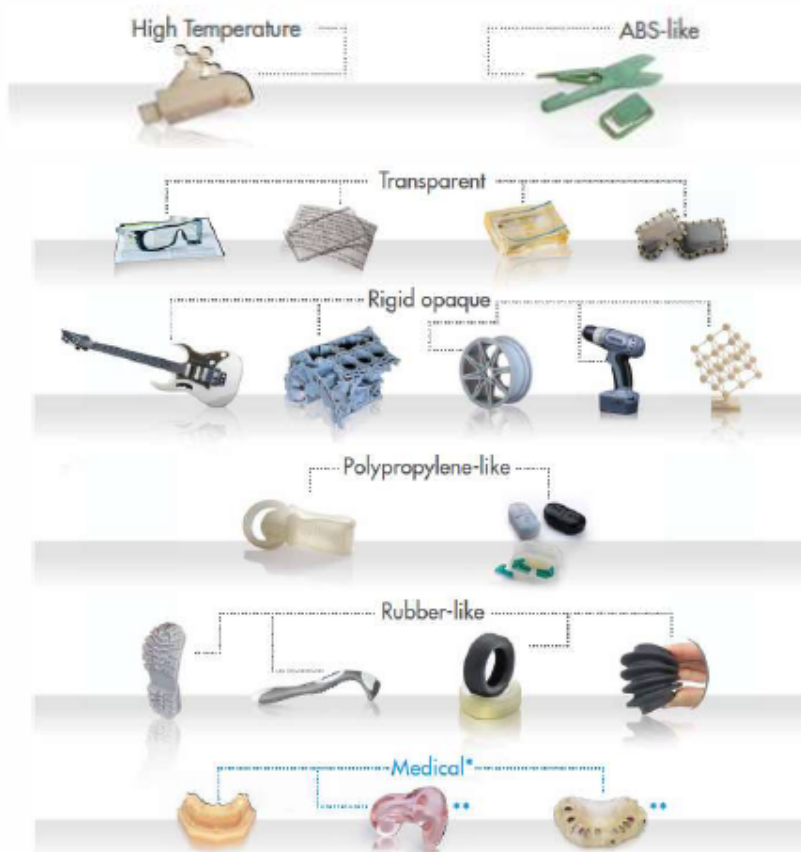


Obr. 2.8 3D tiskárna OBJET Connex 500 [24]

Tab. 2.3 Technické informace k 3D tiskárně OBJET Connex 500 [20]

Rozměry tiskárny (d x š x v)	1420 mm x 1120 mm x 1130 mm,
Maximální rozměr výrobku (d x š x v)	490 mm x 390 mm x 200 mm
Rozlišení tisku	600 dpi x 600 dpi x 1600 dpi
Tloušťka vrstvy	od 0,016 mm
Tloušťka svislé stěny	0,6 mm
Rychlost	20 mm/h,
Formát pro zpracování dat	STL
Přesnost	0,01 mm – 0,03 mm
Hmotnost tiskárny	500 kg

Metoda PolyJet využívá 14 různých materiálů podle typu v průhledné podobě nebo několika variantách barvy, které mají různé mechanické vlastnosti. V dané práci byl zkoumán dvoukomponentní digitální materiál ABS-like RGD5160-DM, vlastnosti kterého jsou uvedené v tab. 2.4.



Obr. 2.9 Materiál, vhodný pro tisk pomocí PolyJet Matrix [24]

Tab. 2.4 Charakteristiky materiálu ABS-like [24]

	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	55-60	psi	8000-8700
Elongation at break	D-638-05	MPa	25-40	psi	25-40
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2600-3000	psi	375,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	65-75	psi	9,500-11,000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	1700-2200	psi	245,000-320,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	58-68	°F	136-154
HDT, °C @ 0.45MPa after thermal post treatment procedure A	D-648-06	°C	82-90	°F	180-194
HDT, °C @ 0.45MPa after thermal post treatment procedure B	D-648-06	°C	92-95	°F	198-203
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	51-55	°F	124-131
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	65-80	ft lb/inch	1.22-1.50
Tg	DMA, E*	°C	47-53	°F	117-127
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	85-87	Scale D	85-87
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	67-69	Scale M	67-69

4. Mechanické vlastnosti materiálů a jejich zkoušení

Abychom ekonomicky a vhodným způsobem využívali technické materiály, musíme dobře znát všechny jejich vlastnosti a bezchybně je umět stanovit.

Vlastnosti materiálů se dělí na:

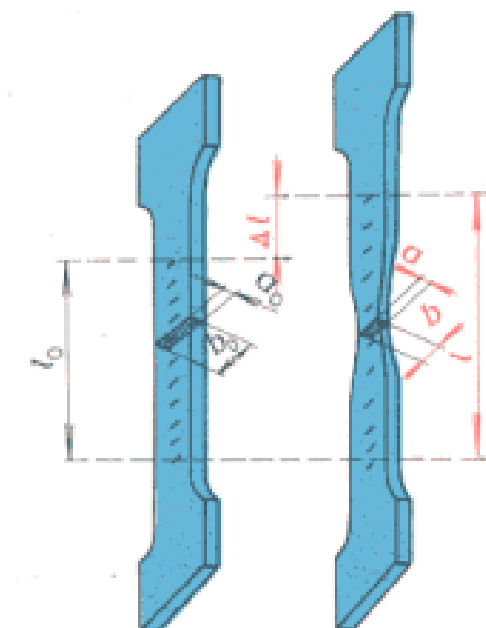
- Fyzikální
- Chemické
- Mechanické

V dané práci se bude jednat o zkoumání mechanických vlastností určitých materiálů a působení stanovených podmínek na jejich vlastnosti.

Materiály při jejich zpracování nebo využití jsou náchylný různorodému namáhání, čím může být tah, ohyb, krut, tlak. V praxi je požadováno, aby materiál mohl snést určitou hodnotu namáhání, tedy by měl udržet požadované vlastnosti (pevnost, tvrdost, pružnost) při působení na něj různých procesů. Veliký vliv na mechanické vlastnosti materiálů má i působení teploty, jelikož při přesně stanovených teplotách se mění jejich krystalická struktura a následně i jejich mechanické vlastnosti. [21]

Mechanické statické zkoušky vyjadřují chování materiálu při působení klidných spojitých vnějších sil. Základem těchto zkoušek jsou zkoušky pevnosti, které se podle způsobu vlivu zátěží dělí na zkoušky pevnosti v tahu, tlaku, ohybu atd. [22]

Cílem této práce je zkoumání mechanických vlastností vytištěných na dvou různých zařízeních trhací zkouškou. Tato zkouška je nejrozšířenější statickou zkouškou, protože pomocí ní dostáváme důležité hodnoty nezbytné pro další propočty prvků a informace pro volbu vyhovujícího materiálu. Tyto zkoušky se provádějí na speciálně podle normy vyrobeném (princip bude popsán níže) tělese, tzv. zkušební tyče. Tyto tyče jsou upevněné do upínacích hlav zkušebního zařízení takovým způsobem, aby došlo k sloučení obou os, osy dané zkušební tyče a bezprostředně i osy hlav trhacího zařízení. Při tahovém namáhání během nějaké doby dojde k deformaci zkušebního tělesa až do jeho porušení. Během zkoušky se určují napětíové a deformační charakteristiky, jmenovitě pevnost v tahu, modul pružnosti, poměrné prodloužení, tažnost a kontrakce (zúžení) testovaného materiálu. [21], [22]



Obr. 3.1 Tvar zkušební tyče pro zkoušku tahem [21]

Při trhacích zkouškách se uchycená tyč deformuje pod vlivem zatěžování neustále narůstající silou, až do jejího přetržení. Při zkoušce se zaznamenává zátěžná síla odpovídající v určitý okamžik určité deformaci. Při statických zkouškách v materiálu pod vlivem vnějších sil vznikají síly vnitřní. Jejich míra se nazývá *napětím*, anebo může být vyjádřena číselně jako podíl působící síly F a odpovídající jí jednotky plochy. Zkušební tyč mění své rozměry pod vlivem zatěžující síly F , z počáteční měřené délky L_0 na stanovenou konečnou L_U , z počáteční měřené plochy příčného průřezu S_0 na konečnou dosaženou S_U . Tedy se jedná o normálové (jmenovité) napětí, jelikož zatěžující osová síla působící kolmo na skutečné ploše průřezu se nazývá skutečným napětím σ , když se změna průřezu zkušební tyče nebere v úvahu (používá se jenom hodnota počátečního průřezu S_0) se nazývá smluvním jmenovitým napětím R . [21], [22]

Pevnost v tahu R_m (σ_d), je napětí dané poměrem maximální zatěžující síly F_{max} , předcházející přetržení zkušební tyče k hodnotě počátečního průřezu S_0 :

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] = [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

Mez kluzu v tahu R_e (σ_k) je nejmenší napětí, při kterém se začne rozvoj výrazných plastických deformací:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ je hodnota napětí způsobující plastickou deformaci 0,2% z L_0 u materiálů, které nemají výraznou mez kluzu.

Celkové nebo absolutní prodloužení zkušební tyče ΔL je:

$$\Delta L = L_U - L_0 \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

Poměrné prodloužení ε se vyjadřuje podílem změny délky tyče ΔL k počáteční délce tyče L_0 :

$$\varepsilon = \frac{L_U - L_0}{L_0} \quad (4)$$

Tažnost A (ε_d) se zjišťuje jako poměrné prodloužení v procentech původní délky:

$$A = \varepsilon \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

Poměrné zúžení průřezu v místě zlomení nebo kontrakce Z je podíl zúžení průřezu zkušebního tělesa v místě zlomu k původnímu průřezu:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6)$$

Namáhání v mezích pružnosti

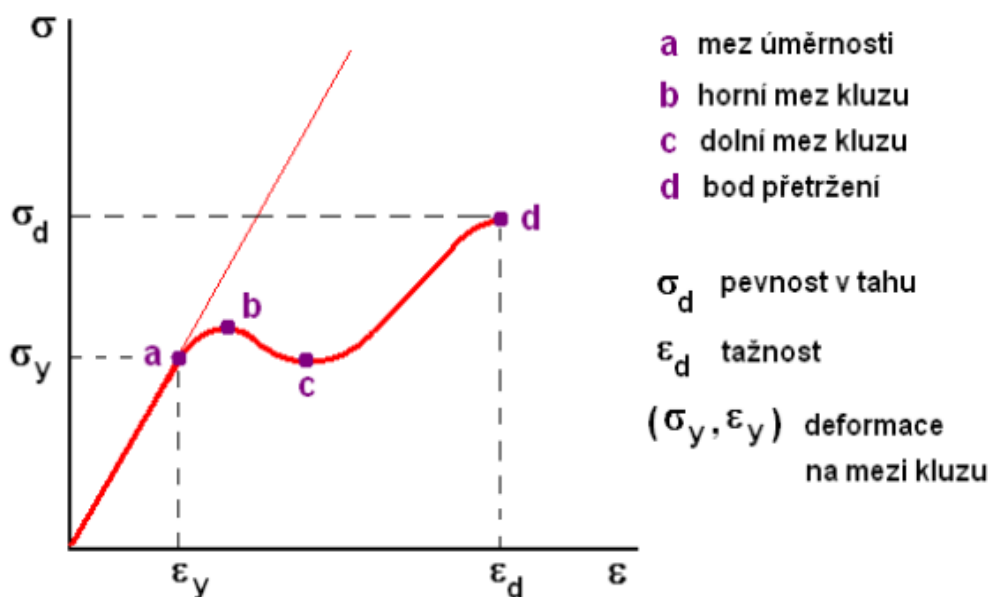
Podle Hookeova zákona důležitým je namáhání v oblasti pružných deformací, kde narůstá deformace (prodloužení) přímo úměrně stoupajícímu napětí:

$$R = E \times \varepsilon \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

kde E je Youngův modul pružnosti v tahu:

$$E = \frac{\sigma_{0,25} - \sigma_{0,5}}{\varepsilon_{0,25} - \varepsilon_{0,5}} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

Pro další výpočty namáhání, uvedené v praktické části této práce, má význam jen diagram $\varepsilon - \sigma$, viz obr. 3.2. [6], [21], [22], [25], [32]



Obr. 3.2 Pracovní diagram z tahové zkoušky [31]

5. Norma trhání

Stanovení tahových vlastností podle ČSN EN ISO 527-2

Předmět normy

- tato část normy ISO 527 definuje podmínky pro stanovení tahových vlastností plastových materiálů pro tváření na základě všeobecných pravidel stanovených v první části (ISO 527-1)

Podstata zkoušky

Vhodnost metod dle následujících skupin materiálů:

- polotuhé a tuhé termoplastické tvářecí, odlévací a vytlačovací materiály. K tomu také patří plněné a vyztužené směsi (tyčinkami, destičkami, granulemi, krátkými vlákny), v dodacích do neplněných typů;
- polotuhé a tuhé reaktoplastové lisovací a odlévací, zároveň i plněné a vyztužené materiály;
- termotropní polymery na základě tekutých krystalů.

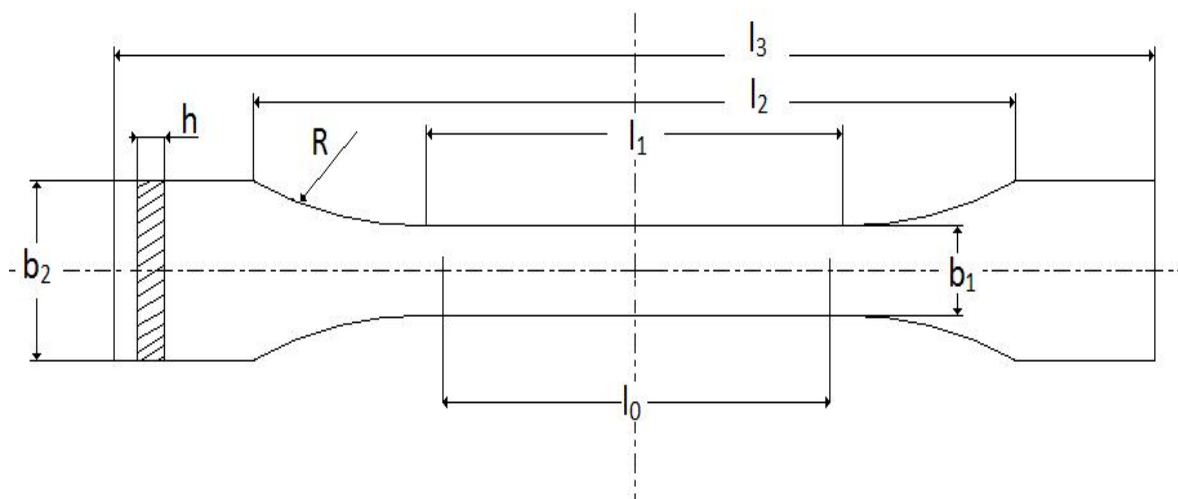
Metody nejsou vhodné pro materiály vyztužené textilními vlákny, a také pro tuhé lehčené materiály a sendvičové struktury jich obsahující.

Zkušební zařízení

- viz ISO 527-1:1993
- dostupné zařízení na katedře KST HOUNSFIELD H10KT s řídicím programem QMAT.

Zkušební těleso

- doporučené množství zkušebních tělísek viz ISO 527-1:1993
- přednost použití víceúčelových zkušebních tělísek (viz ISO 3167:1993)
- zkušební tělesa musí být vytvářena nebo vstřikována podle materiálové specifikace. A nebo vyrobena mechanickým obráběním z desek (vylisovaných nebo vstřikovaných z určitého materiálů)
- povrchy zkušebních těles musí být zkontrolovány na existenci nedostatků (viditelných vad, vrypů apod.)



Obr. 4.1 Zkušební těleso typ 1A a 1B [7]

Tab. 4.1 Rozměry zkušebních těles a rozvržení zkoušky [7]

Popis parametru		Typ tělesa, [mm]	
		1A	1B
L_3	celková délka	$\geq 150^{1)}$	
L_1	délka zúžené části	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
R	poloměr	20...25	≥ 60
b_2	šířka na koncích	$20 \pm 0,2$	
b_1	šířka zúžené části	$10 \pm 0,2$	
h	tloušťka	$4 \pm 0,2$	
L_0	počáteční měřená délka	$50 \pm 0,5$	
L	počáteční vzdálenost mezi sevřením	115 ± 1	

¹⁾V některých případech (to závisí na druhu materiálu) délka lopatek může být i větší, aby nedošlo k lámání nebo proklouzávání tělesa v čelistech.

Postup zkoušky

- viz ISO 527-1:1993,
- při zjišťování maximálního prodloužení a stanovení modulu pružnosti v tahu při provádění kvalifikační zkoušky se používá rychlost zatěžování 50mm/min,
- při provádění běžné kontroly se používá větší rychlost,
- změří se šířka a tloušťka zkušebního tělesa,
- těleso se umístí do přístroje osou kolmo na podpory, uchytí se,
- nastaví se vzdálenost podpěr,
- těleso se nepřerušovaně zatěžuje zatěžovacím trnem,
- v určitém softwaru se zaznamenává síla na čase (posuvu zatěžovacího trnu) ,
- nakonec se zaznamenává maximální zatížení v momentě zlomu.

Vyjádření a platnost výsledků

- viz ISO 527-1:1993 [7]

6. Cíle experimentu

Cílem praktické části bylo navrhnutí modelu zkušebních tyčí v CAD softwaru, následně jejich vytvoření na 3D tiskárnách, pracujících na technologii Rapid Prototyping. Po dokončení jejich výroby byly provedeny zkoušky na zjištění mechanických vlastností zkušebních tyčí a to přesněji na zkoušku tahem. Zájem byl kladen zejména na pozorování různého nastavení parametrů tisku a sledování vlivu následných operací stárnutí a temperace. Zkoušky tahem byly provedeny na univerzálním stroje HOUNSFIELD H10KT s řídicím programem QMAT dostupném na katedře KST na oddělení tváření kovů a plastů. Po určitém počtu testů bylo možné stanovit vliv nastavení parametrů tisku a následných operací (stárnutí a temperace) na pevnost v tahu, tažnost a mez kluzu v tahu.

Postup při experimentu:

- Nakreslení 3D modelu.
- Vytvoření formátu STL.
- Příprava dat pro 3D tisk.
- Výroba sady zkušebních tyčí na tiskárně FDM.
- Výroba sady zkušebních tyčí na tiskárně PolyJet.
- Vystavování části tyčí temperaci.
- Vystavování části tyčí procesu stárnutí.
- Provedení mechanických zkoušek tahem.

6.1. 3D CAD model zkušební tyče

Pro provedení mechanických zkoušek je potřeba mít určitý tvar zkušebního tělesa, rozměry a forma jsou normalizovány. Dle přesně stanovených požadavků pro provedení zkoušky tahem, podle přesně uvedených v normě ČSN EN ISO 527-2 rozměrů, v programu ProEngineer byla nakreslena zkušební tyč, zobrazená na obr. 5.1.

6.2. STL formát

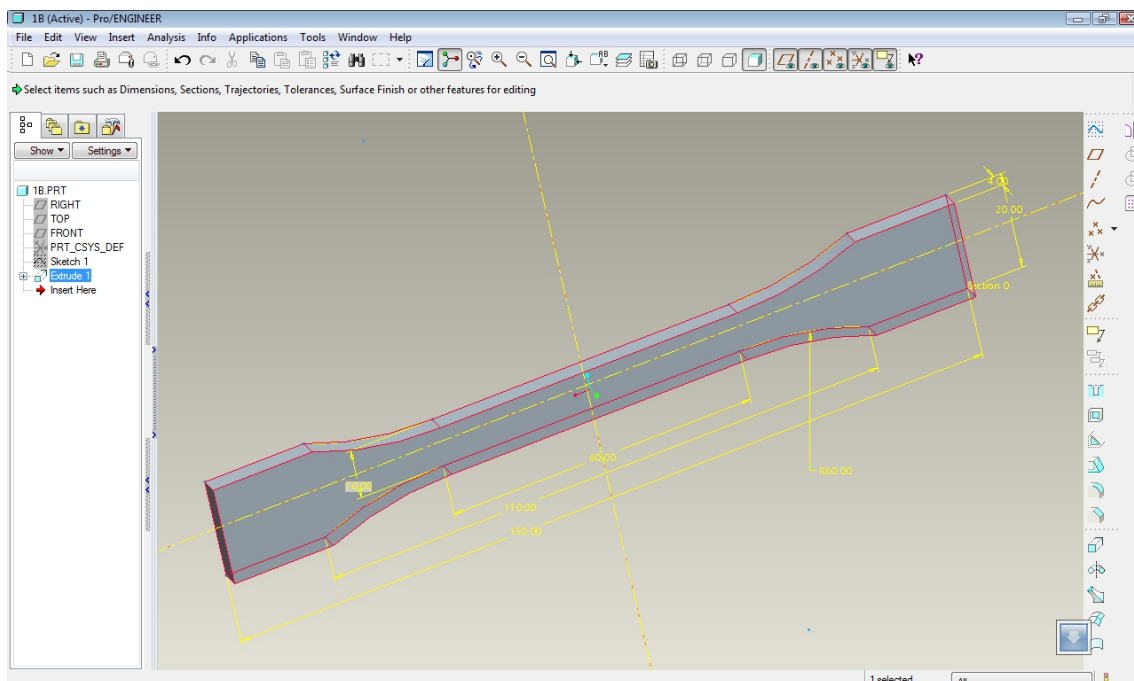
Nakreslená data zkušební tyče z CAD softwaru (ProEngineer) musí být převedena do formátu STL, s kterým pracuje většina softwarů strojů RP. Proto 3D data dané zkušební tyče byla uvedeným softwarem převedená do formátu STL, který rozdělil celý povrch dané tyče na velké množství spojených mezi sebou malými jednotlivými trojúhelníky, celkem jich bylo 60, což je vidět na obr. 5.2. Uskutečněné převedení prošlo bez chyb, proto žádné opravy v rozmístění trojúhelníků na povrchu součástí nebyly potřebné.

6.3. Příprava dat pro tisk

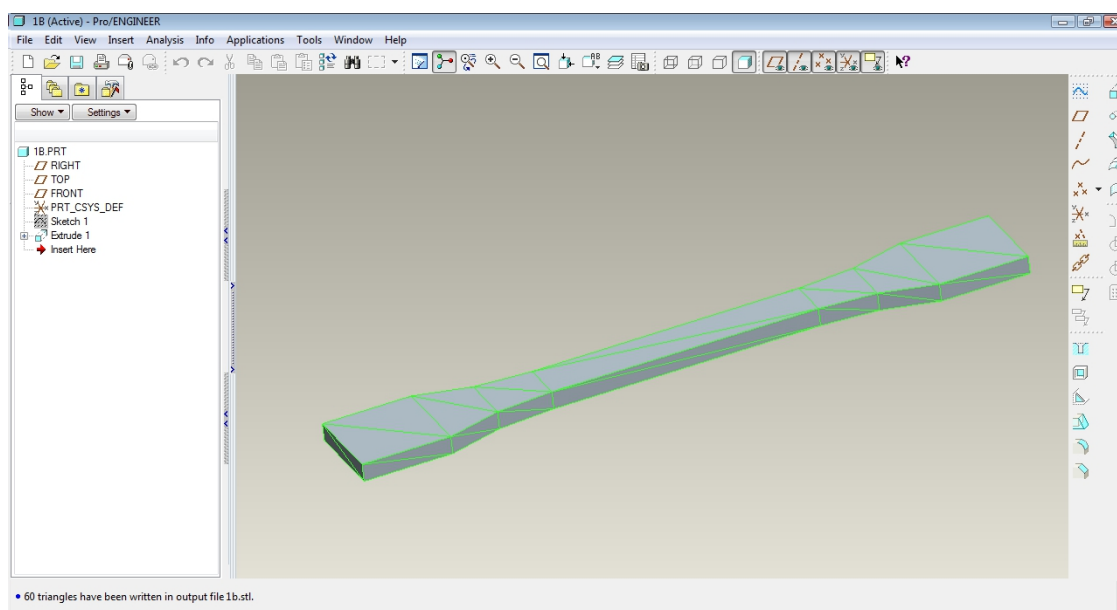
Pro danou zkušební tyč dále bude detailně popsán technologický postup výroby na dvou různých typech zařízení technologií RP, dostupných na katedře výrobních systémů (FDM a PolyJet Matrix). Každé z uvedených zařízení má svůj software od výrobců na zpracování vstupních údajů, kterými jsou nakreslená data v STL formátu. Dále následuje sada procesu jako generace tenkých řezů trojúhelníkového modelu na

vyhovující množství vrstev a orientace modelu na základní desce vzhledem k pracovnímu pohybu tiskové hlavě, co může měnit mechanické vlastnosti materiálu.

Prvním vyzkoušeným zařízením je 3D tiskárna firmy Dimension SST 768, pracující na metodě FDM. Druhým vyzkoušeným zařízením je 3D tiskárna OBJET Connex 500, pracující na metodě PolyJet.



Obr. 5.1 Zkušební tyč typu 1B, vytvořená v programu ProEngineer



Obr. 5.2 Zkušební tyč, převedená do formátu STL

6.3.1. Technologický postup výroby na 3D tiskárně Dimension SST 768

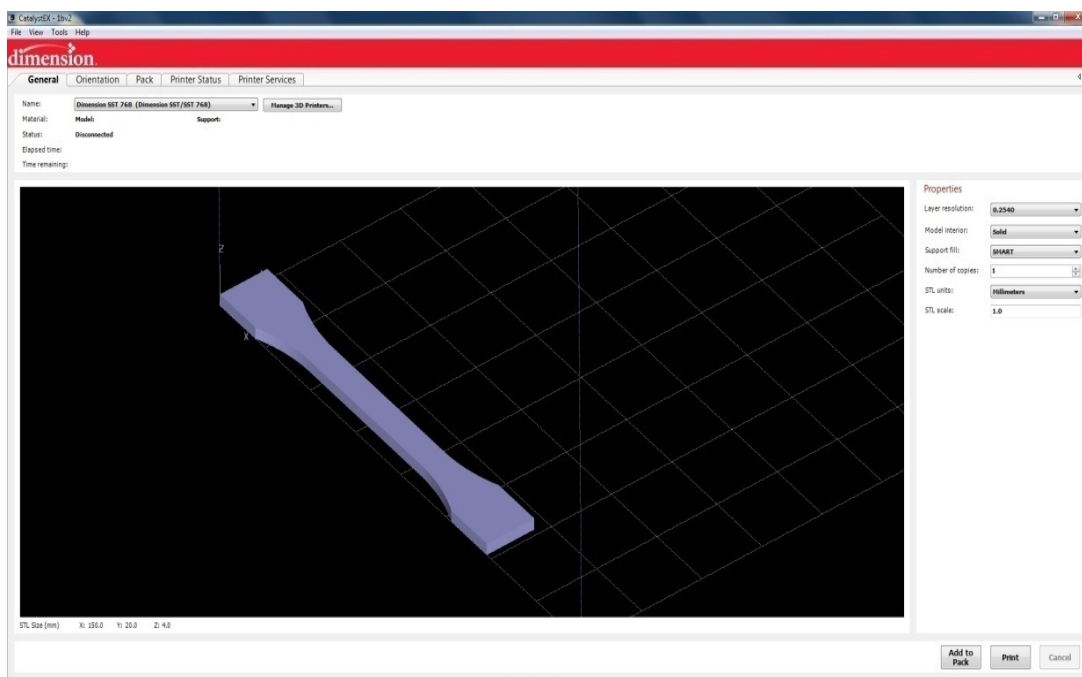
Táto tiskárna má svůj vlastní program CatalystEX od firmy Stratasys, který připravuje 3D data pro tisk. Přes tento program, nainstalovaný na kterémkoliv počítači, pak se posílá data do tiskárny Dimension SST 768 do vlastního počítače, umístěného zevnitř tiskárny, s kterého probíhá nastartování a řízení tisku, které se provádí bezprostředně na tiskárně.

Pro výrobu zkušebních tyčí a následnou trhací zkoušku byl použit netoxický plastový materiál: modelovací tuhý a vláčný ABS, jako podpůrný byl použit Support P400.

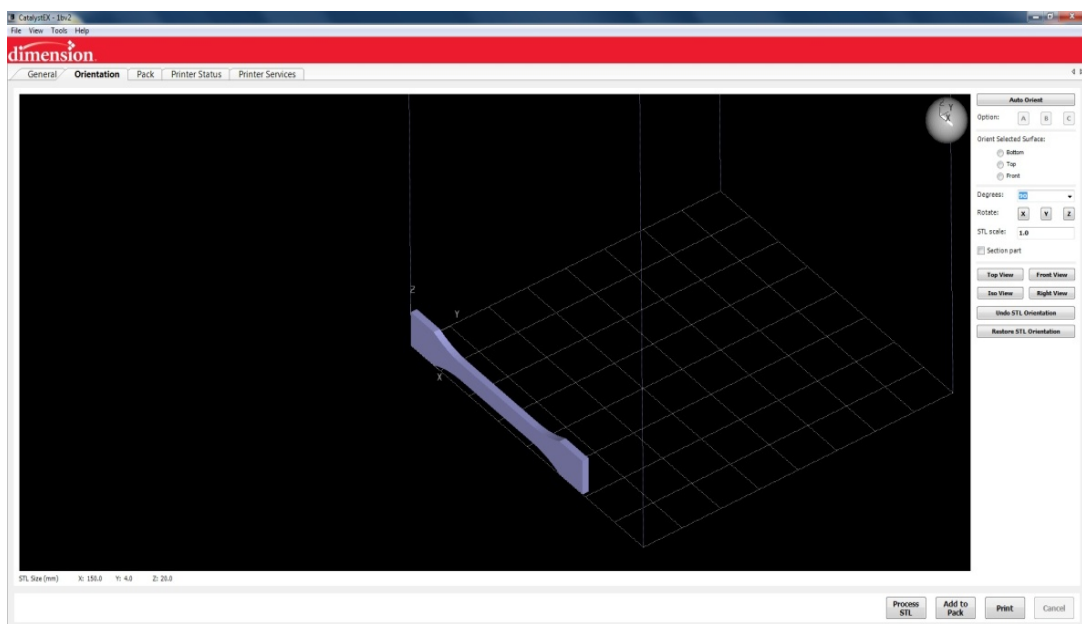
Do programu CatalystEX byla uložena 3D data zkušebních tyčí nakreslená a převedena do formátu STL v ProEngineeru. Dále následuje postup nastavení parametrů tisku.

- 1) Nastavení základních parametrů pro zvolenou tiskárnu v záložce *General*, je zobrazené na obr. 5.3.
 - Jako první potřebujeme zadat tloušťku vrstev, přičemž čím hladší povrch součásti potřebujeme, tím menší hodnotu musíme zavést, ale tehdy tisk zabere více času. Možnosti jsou od 0,254 nebo 0,330 mm. Námi byla zvolena tloušťka vrstvy 0,254mm.
 - V další řadě zvolíme vyplnění modelu, tj. strukturu zkušební tyče, třeba Solid pro silnější a pevnější části (v daném tisku byl použit námi), anebo Sparse (řídká struktura) s menší odolností pro rychlost výroby a nižší spotřebu materiálu.
 - Dále zvolíme typ struktury podpor Smart. Pro většinu modelu se používá styl Basic, obkládá okrajové části modelu. Styl Sparse je pro neobtížnou výrobu a staví co nejmenší podpor. Styl Surround naopak obkládá celý model.
 - Zadáme potřebný počet kopií zkušební tyče.
 - Potřebujeme zadat jednotky modelu, při kterých bude proveden tisk a vybrat měřítko modelu. V našem nastavení jsme zvolili milimetry. [23]
- 2) Možností orientace modelu na pracovní desce v záložce *Orientation*. Model by měl být umístěn co nejlepším způsobem pro tisk na dostupné ploše. Tisková hlava se pohybuje diagonálně na pracovní desku, materiál se nanáší pod sklonem 45°. Rozmístění modelu může být podél jedné z hran pracovní desky. Když model natočíme diagonálně ve směru jízdy tiskové hlavy, vlákna materiálu budou nanesené

podélně modelu. Když model bude položen kolmo na směr jízdy tiskové hlavy vlákná materiálu se nanáší napříč délky modelu. V daném případě je umístění tyče na bok ve směru x, viz. obr. 5.4 Model může být umístěn na pracovní desce i automatickou orientací z programu, nebo dle ploch, anebo modelem lze ručně hýbat a otáčet podle os X, Y, Z. [19], [23]

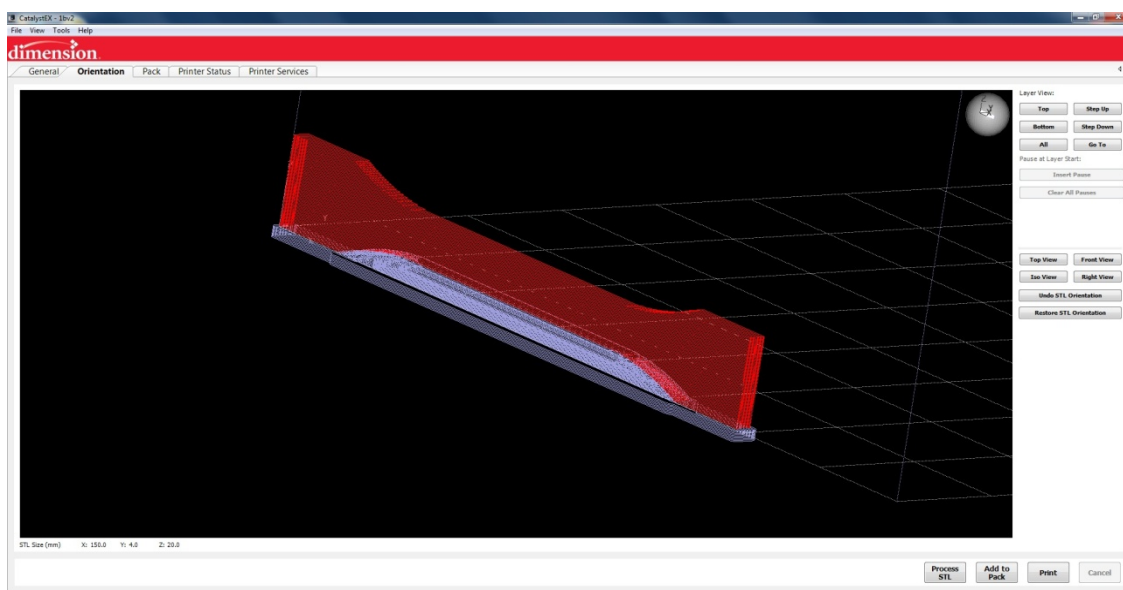


Obr. 5.3 Nastavení základních hodnot pro tisk

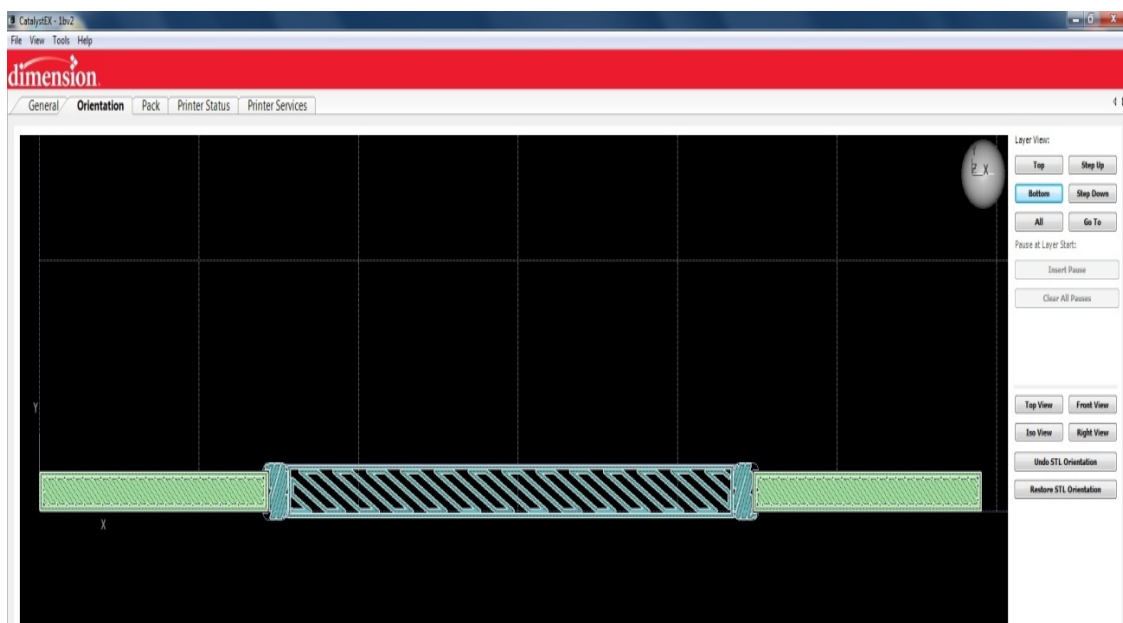


Obr. 5.4 Orientace tyče na pracovní desce tiskárny Dimension SST 768

- 3) Po ustavení modelu zkušební tyče vhodným způsobem je třeba převést data z STL formátu do jednotlivých vrstev, na což slouží tlačítko *Process STL*. Po zmáčknutí se spustí proces převodu a výsledek dostaneme požadovaný model, ale sestavený z řady průřezů, které jsou zobrazené červenou barvou a šedou barvou potřebný počet průřezů pro výrobu podpory, viz obr. 5.5. Tady je také umožněno prohlížení nanášení materiálu po jednotlivých řezech, což je vidět na obr. 5.6 . Jsou zde vidět dráhy pohybu hlavy. [19]

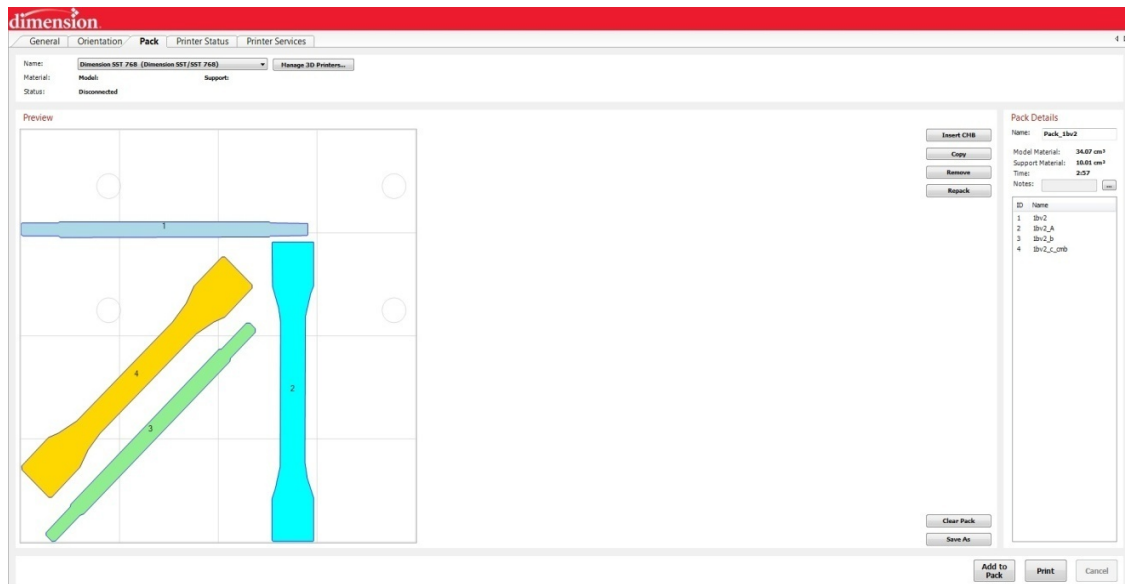


Obr. 5.5 Zobrazení průřezů modelu



Obr. 5.6 Znázornění podélného řezu jednotlivé vrstvy

- 4) Další příkaz je *Add to Pack*, tím přejdeme do záložky *Pack*, kde se tištěný model ukáže na pracovní ploše shora. Tady se ukazuje rozmístění daného modelu a možnost rozmístění dalšího potřebného množství kopií modelu na pracovní ploše tiskárny. V pravé části okna jsou uvedené podrobnosti pro tisk dané sady zkušebních tyčí, například spotřeby modelovacího a podpůrného materiálu, čas tištění modelu, viz obr. 5.7. [19]



Obr. 5.7 Zobrazení rozmístění zkušebních tyčí na ploše, orientovaných různými způsoby dle směru jízdy tiskové hlavy

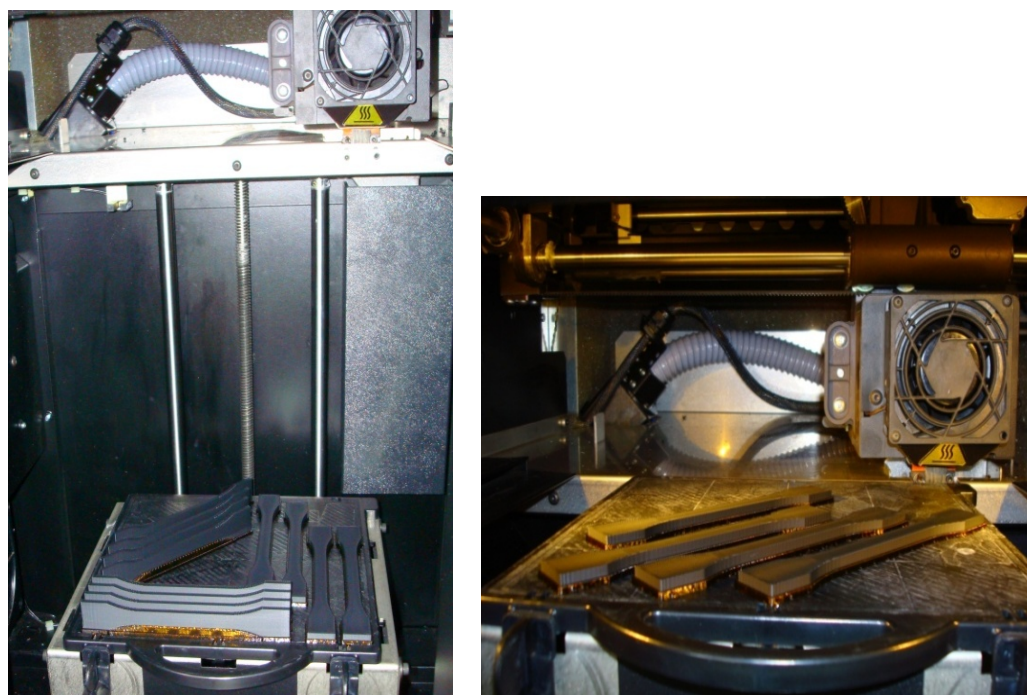
Na uvedeném výše obrázku je umístění tyčí :

- ve směru jízdy tiskové hlavy
 - na bok – vzorek č. 3
 - na plochu – vzorek č.4
- pod úhlem 45° na směr jízdy tiskové hlavy
 - na bok – vzorek č. 1
 - na plochu – vzorek č.2

- 5) Poslední co ukáže program je okno *Printer Status*, kde jsou shromážděna všechna data a parametry nastavení pro tisk daného modelu, a to přesněji stav stroje, datum tisku, doba trvání tisku, čas začátku a ukončení tisku, spotřebovaný materiál modelový a podpůrný, stav materiálů v zásobníku tiskárny během

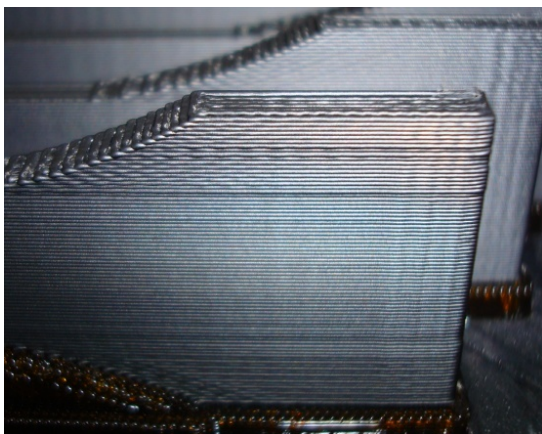
stavby modelu a počet nanesených vrstev. To je finální krok v nastavení parametrů tisku před odesláním příkazu tisku *Print* do tiskárny, následně z které bude spuštěn vlastní tisk modelu. [19], [23]

- 6) Princip tisku tiskárny. Vlastní tisk modelu se začne po zmáčknutí tlačítka přímo na displeji tiskárny. Dále není třeba hlídat nebo nějakým způsobem obsluhovat stroj, je docela automatický a je řízen počítačem ve stroji. Teplota v pracovní komoře je kolem $73 - 75^{\circ}\text{C}$ a udržuje se 4 horkovzdušnými ventilátory. Materiál se při stavbě ohřívá do teploty kolem 270°C . Nejdřív se na pracovní desku nanese podložka z podpurného materiálu hnědé barvy a pak se po jednotlivých vrstvách vytiskne model materiálem ABS černé barvy, viz. obr. 5.8. Po dokončení tisku se hotový model odlomí od pracovní desky a musí být očištěn od podpor. [13], [23]

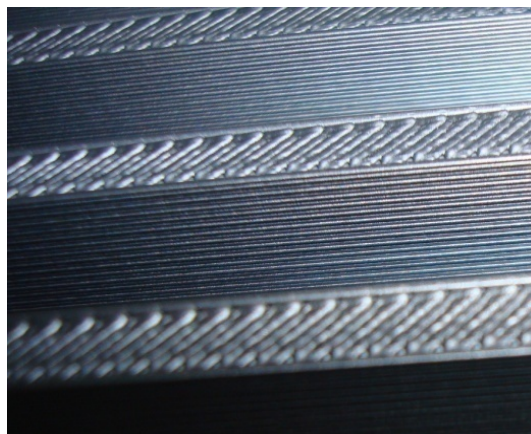


Obr. 5.8 Zobrazení procesu tisku na Dimension SST 768

a)



b)



c)

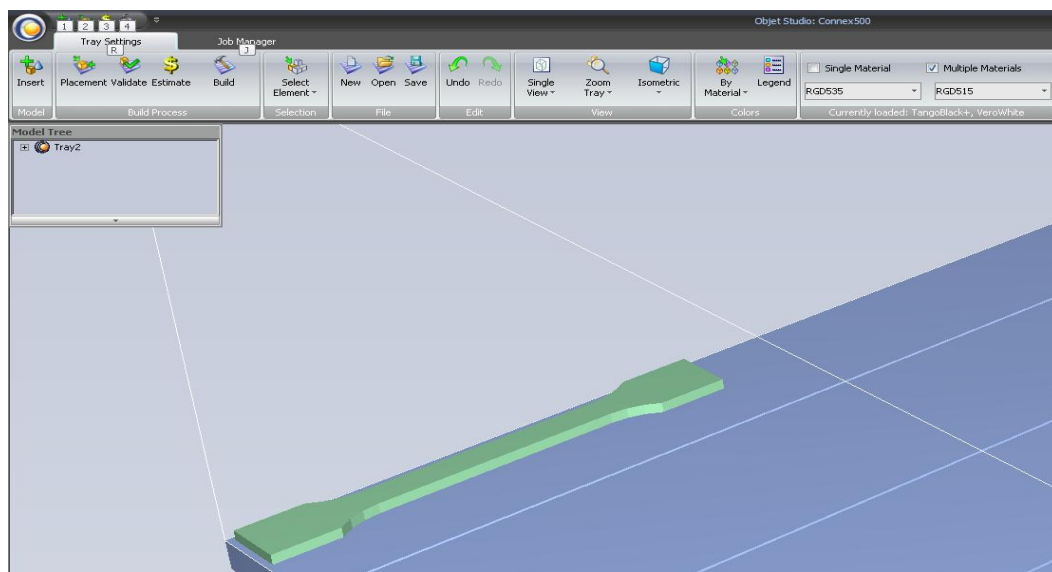


Obr. 5.9 Detail směru nanesení
vrstev při umístění tyče:

- a) podélně směru jízdy hlavy na bok,
- b) příčně na bok,
- c) příčně na plochu

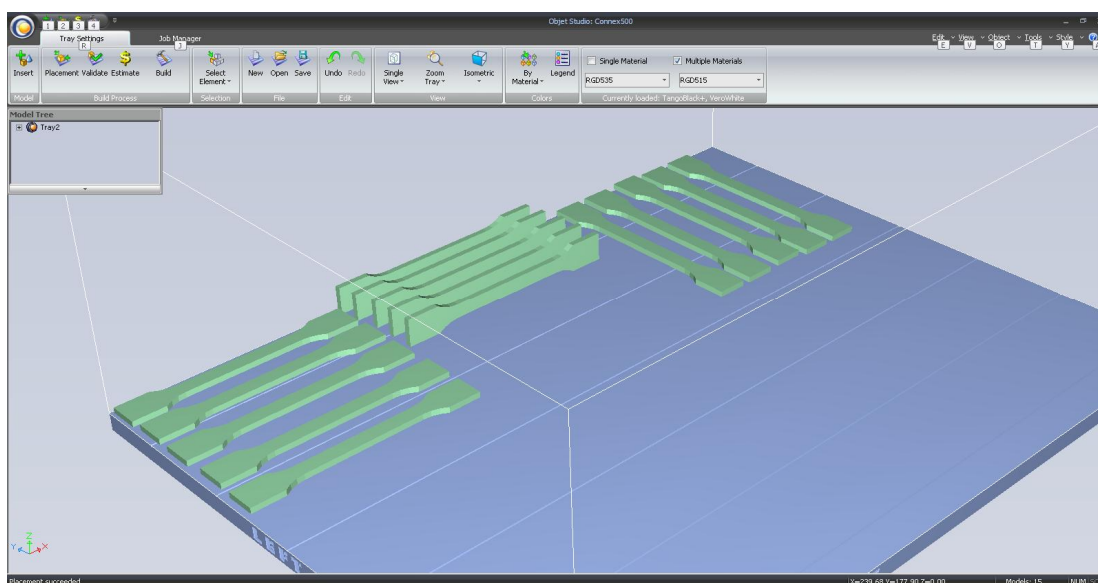
6.3.2. Technologický postup výroby na 3D tiskárně Connex 500

- 1) Výroba na této tiskárně je řízena přes vlastní software Objet Studio pro Connex 500 od firmy OBJET, nainstalovaný na jakémkoli dostupném počítači. Po spuštění softwaru jsme dle komponentů zvoleného materiálu vybrali ekonomický režim tisku a nastavili informace o materiálu. Jako modelovací materiál byl zvolen ABS-like podle svých dobrých pevnostních charakteristik, jako podpůrný byl použit FullCure[®]705 Support.
- 2) Druhým krokem bylo nahrání dat z STL formátu a tyč umístěna do pracovního prostoru, zobrazeného na obr. 5.10



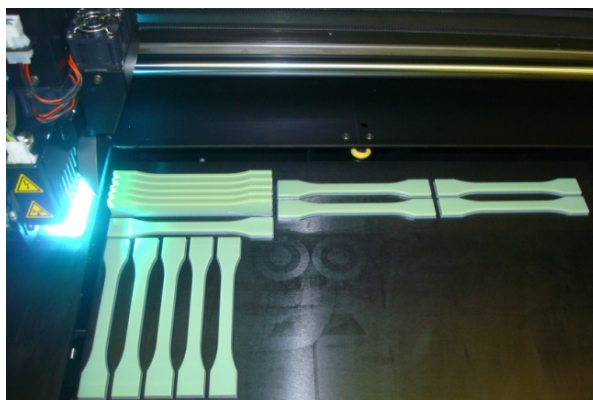
Obr. 5.10 Nahraná data zkušební tyče do softwaru Objet Studio

- 3) Dále bylo provedeno nastavení počtu kusů potřebných pro trhací zkoušku a jejich rozmístění v pracovním prostoru tiskárny ohledně očekávaných charakteristik. Udělali jsme výrobu zkušebních těles po 5 kopiích při každém odlišném nastavení tisku, což je vidět na obr. 5.11. Byla zvolena orientace 5 zkušebních těles podélně jízdy tiskové hlavy, která se pohybuje podél dlouhé hrany pracovní desky. Bylo rozmístěno 5 tyčí podélně jízdy tiskové hlavy, ale byly položeny na bok. A poslední variantou bylo rozmístění zkušební těles příčným směru kolmo na směr jízdy tiskové hlavy.



Obr. 5.11 Orientace zkušebních tyčí na pracovní desce v softwaru Objet Studio

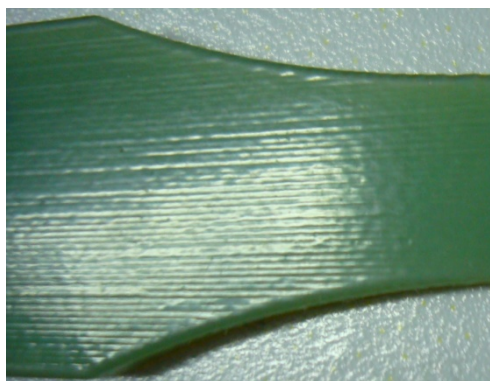
Po schválení rozmístění těles na desce programem byl začat vlastní tisk, při kterém na obrazovce počítače byla ukázána spotřeba materiálů, zbývající čas a procent ukončení tisku, viz obr. 5.12



Obr. 5.12 Proces 3D tisku tiskárnou Connex 500

- 4) Pak stejným způsobem bylo vytištěno ještě několik dávek zkušebních těles, které budou vystavené procesu stárnutí a temperaci.
- 5) Po ukončení tisku byly hotové modely odlepeny od desky škrabkou a očištěné od podpůrného gelového materiálu tlakem vody, osušené, rozdělené a poslané každý podle svého účelu na další operaci, viz obr.5.13.

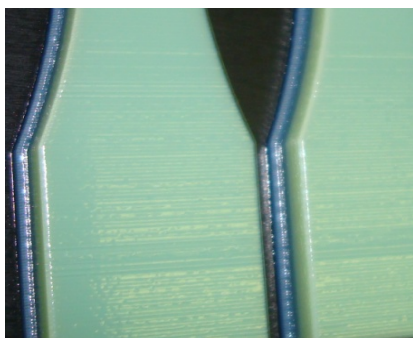
a)



b)



c)



Obr. 5.13 Detail směru nanesení vrstev při umístění tyče:

- a) podélně směru jízdy hlavy na plochu,
- b) podélně směru jízdy hlavy na bok,
- c) příčně na plochu

6.4. Proces temperace

Při výrobě zkušebních tyčí na tiskárně OBJET Connex 500 byl použit digitální materiál ABS-like RGD5160-DM, složený ze dvou komponentů RGD515 a RGD535 (FullCure515 a FullCure535). Díly, vyrobené z uvedeného materiálu mají teplotu tvarovou stability (HDT) 58–68°C. [26] Dále budou popsány dvě varianty tepelného ošetření, v důsledku kterých se bude dosáhnuta větší teplostojnost vyrobených modelů z uvedeného materiálu. Oba postupy jsou stejně vhodné pro daný materiál, jen se liší v požadované teplotě tvarové stability a době trvání procesu. Pro daný proces byl použit software Celsius 2005, pomocí kterého se nastaví vstupní data do programovatelné trouby.

Aby nedošlo k narušení průběhu tepelného zpracování, bylo vybráno co nejlepší rozmístění vytištěných tyčí v programovatelné troubě. Nebyly použity žádné podpory z důvodu absence tenkých stěn a tyče byly položeny na rovný povrch, což je vidět na obr.5.14.

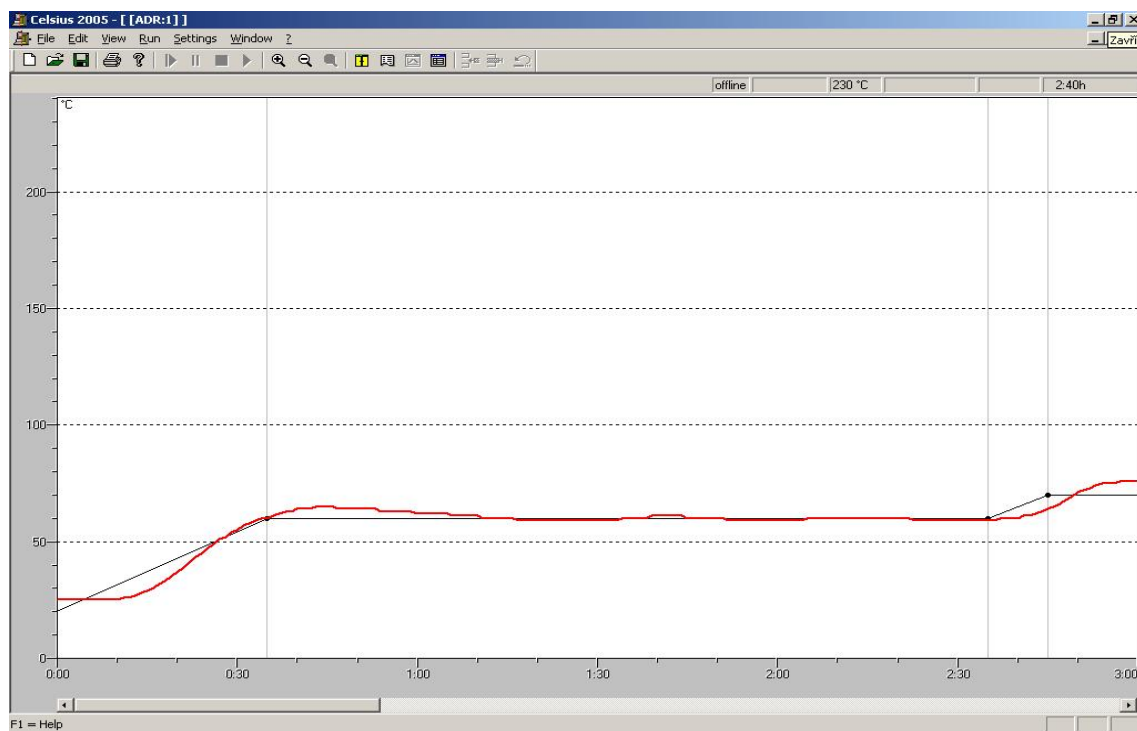


Obr. 5.14 Umístění zkušebních tyčí, vystavených procesu temperace

6.4.1. Postup temperace 1

- Požadovaná teplota tepelné deformaci je 90°C.
 - Doba trvání temperace: přibližně 7 hodin včetně chlazení.
- 1) Z tyčí byl odstraněn všechen podpůrný materiál.
 - 2) Tyče byly umístěny do trouby při pokojové teplotě 25°C.
 - 3) Byla nastavena teplota doby rozběhu 1°C na minutu.
 - 4) Byla nastavena teplota 60°C a následně zapnutá trouba. Požadovaná teplota byla dosažena přibližně za 35 minut.
 - 5) Při stálém udržení teploty 60°C byly tyče ponechané v peci dvě hodiny.
 - 6) Byla nastavena teplota 70°C, která byla dosažena za 10 minut a tyče byly dvě hodiny vystaveny této teplotě.
 - 7) Byla nastavena teplota 80°C, která byla dosažena za dalších 10 minut a byla stále udržovaná jedné hodinu.
 - 8) Dále pec byla vypnuta a zkušební tyče byly nechány uvnitř do snížení teploty alespoň do 35°C, později byly vyjmuty ven. [26]

Průběh skutečné temperace 1 a nastavených hodnot je možné vidět na grafu 5.1

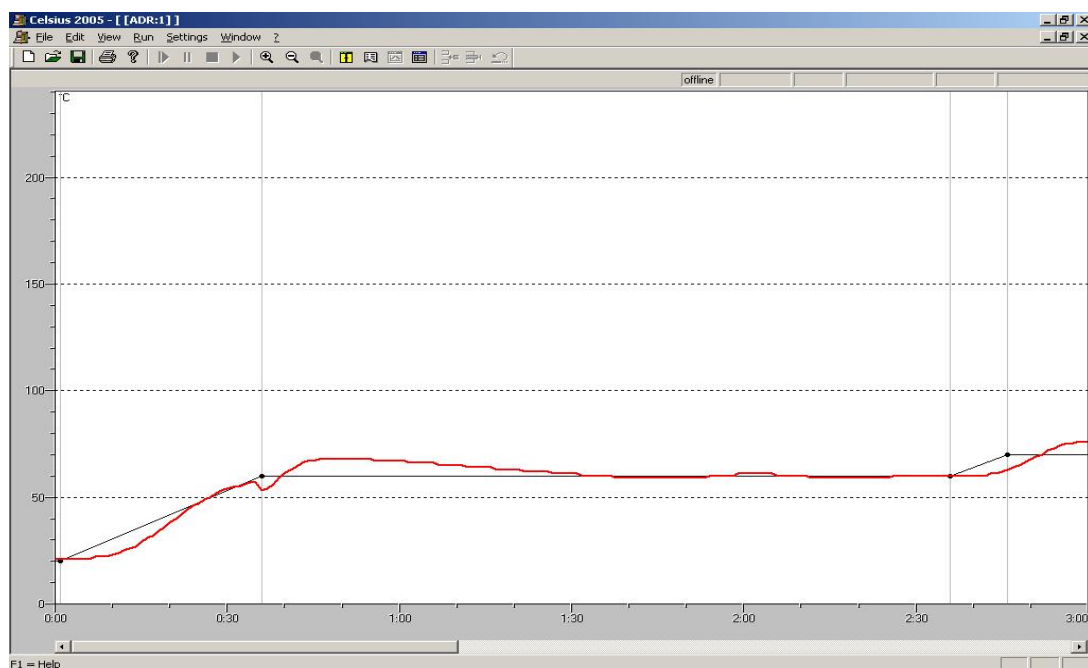


Graf 5.1 Průběh temperace 1

6.4.2. Postup temperace 2

- Požadovaná teplota tepelné deformace je 100°C.
 - Doba trvání temperace: přibližně 9 hodin včetně chlazení.
- 1) Z tyčí byly odstraněny všechny podpory.
 - 2) Tyče byly umístěny do trouby při pokojové teplotě 25°C.
 - 3) Byla zavedena teplota doby rozběhu 1°C na dobu 1 minuty.
 - 4) Byla zvýšena teplota ohřátí na 60°C a hned zapnutá trouba. Požadovaná teplota byla dosažena přibližně za 35 minut.
 - 5) Pod vlivem stálé teploty 60°C byly tyče v troubě dvě hodiny.
 - 6) Byla zvolena teplota 70°C, která byla dosažena během 10 minut a tyče byly dvě hodiny vystaveny této teplotě.
 - 7) Byla zvýšena teplota na 80°C, která byla dosažena během 10 minut a byla stále udržovaná jednu hodinu.
 - 8) Dále teplota byla naposled zvýšena na požadovanou teplotu 100°C a byla udržovaná jednu hodinu.
 - 9) Pec byla vypnuta a zkušební tyče byly nechány u vnitř do dosažení teploty méně než 35°C, poté byly vyndány. [26]

Průběh temperace 2 je uveden na grafu 5.2



Graf 5.2 Průběh temperaci 2

6.5. Proces stárnutí

Hned po procesu vytvoření plastového dílu vznikají nezměrné, ale i nevratné změny struktury jeho materiálu a jeho vlastností, způsobené působením vnějším prostředím a času. Dokončený výrobek je hned vystaven působení řadě vnitřních a vnějších podmínek. Daná práce se zabývá zjištěním vlivu vnějších podmínek, což je třeba teplota, sluneční záření, mechanická síla, vlhkost atd. Pod *stárnutím* se rozumí celá skupina vnitřních dějů, probíhajících v materiálu daného modelu postupně s časem a tyto děje nejsou ovlivněné použitím nebo nepoužitím modelu. Přitom to neznamená, že dochází jenom ke zhoršování vlastností, ten proces jenom vyznačuje časový faktor.

- Přírozené stárnutí – probíhající v izolovaném prostředí nebo při slunečním záření. Světelné záření má hlavní podíl na znehodnocování plastů.
- Umělé stárnutí – proces stárnutí při umělém zvýšení teploty okolí. [28],[29],[32]

Vyrobená sada zkušebních tyčí z výše uvedeného s plastu ABS-like byla vystavena na dobu 3 měsíců na volném prostoru v laboratoři.

Proces stárnutí zkušebních tyčí, vytištěných na stroji Connex 500 při teplotě kolem pracovní desky 26°C, probíhal při pokojové teplotě 22°C. Zkušební vzorky nebyly ovlivněny slunečním zářením, ani tedy UV-zářením, ani změnami vlhkosti, vliv měla v daném případě jenom teplota okolí.

Působením světla, slunečního záření a UV-zářením dochází k fotooxidaci polymerů. Jinak reakcí bez vlivu světla vůbec neproběhne nebo proběhnou, avšak velmi pomalu. Proto vzorky byly ponechané po delší dobu a to přesněji na dobu 3 měsíců od data výroby. [30]

7. Tahová zkouška

- Křivky v pracovním diagramu zkoušky tahem jsou označeny číselným označením $n - k$, kde n je číslo, označující danou skupinu vzorků při zkoušce a k je číslo zkoušeného vzorku v skupině n dle pořadí provedené zkoušky.
- Označený bod na znázorněných křivkách pracovního diagramu zkoušky tahem označuje, kde se nalézá R_m , které je rovno hodnotě smluvního napětí na mezi

kluzu R_e , protože plasty patří mezi materiály s nevýraznou mezí kluzu, která se určuje pomocí rovnoběžky s lineární částí průběhu tahové zkoušky vycházející z hodnoty 0,2% deformace.

- Počátek tahové křivky má lineární průběh nebo se alespoň této funkci blíží. Způsobené deformace jsou vratné, dokud křivka nedosáhne bodu elasticity. Po překročení meze elasticity se projeví trvalá deformace. Průběh křivky má stále rostoucí trend, který již ale není lineární a to až do bodu R_m , po kterém dochází k snížení napětí při stále rostoucí deformaci, což znamená, že ke konstantní deformaci tělesa stačí stále menší napětí. Toto chování je pro polymery charakteristické, protože dochází k orientaci a protahování makromolekul ve směru působící síly a to až do porušení soudržnosti vzorku. Průběh křivky před přetržením vzorku má ustálený charakter, kdy dochází k deformaci již za takřka konstantního napětí. [27]
- V tab. 5.1 jsou zaznamenané výsledné hodnoty ze zkoušky tahem zkoušebního tělesa z materiálu ABS-like,

kde F_{\max} - maximální zatěžující síla, [N],

R_m - pevnost v tahu, [MPa],

E - Youngův modul pružnosti v tahu, [MPa],

$A_{v \max}$ – prodloužení v maximu, [%],

$A_{\text{extenz.}}$ – prodloužení extenzometru, [%],

- K názorné vizualizaci výsledků zkoušek údaje byly prezentovány směrodatnou odchylkou, která ukazuje velikost rozdílu dané hodnoty od střední hodnoty v procentech, vypočtenou dle vzorce:

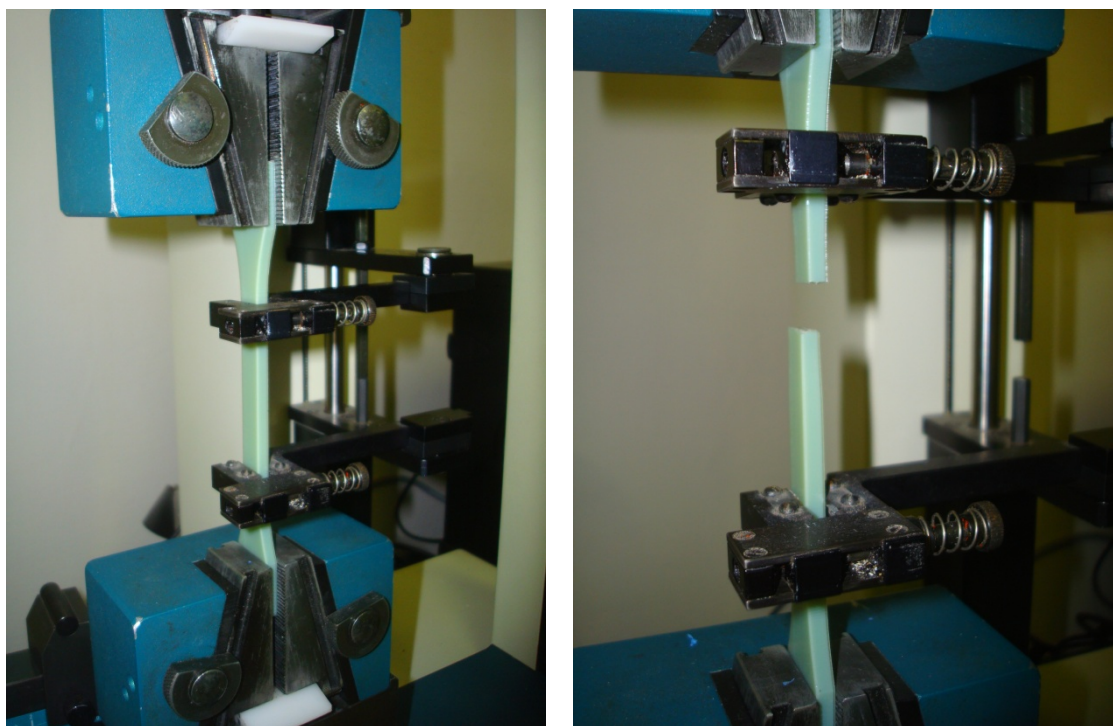
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (9)$$

, kde \bar{x} - střední hodnota všech hodnot,

x_i - hodnota i vzorku,

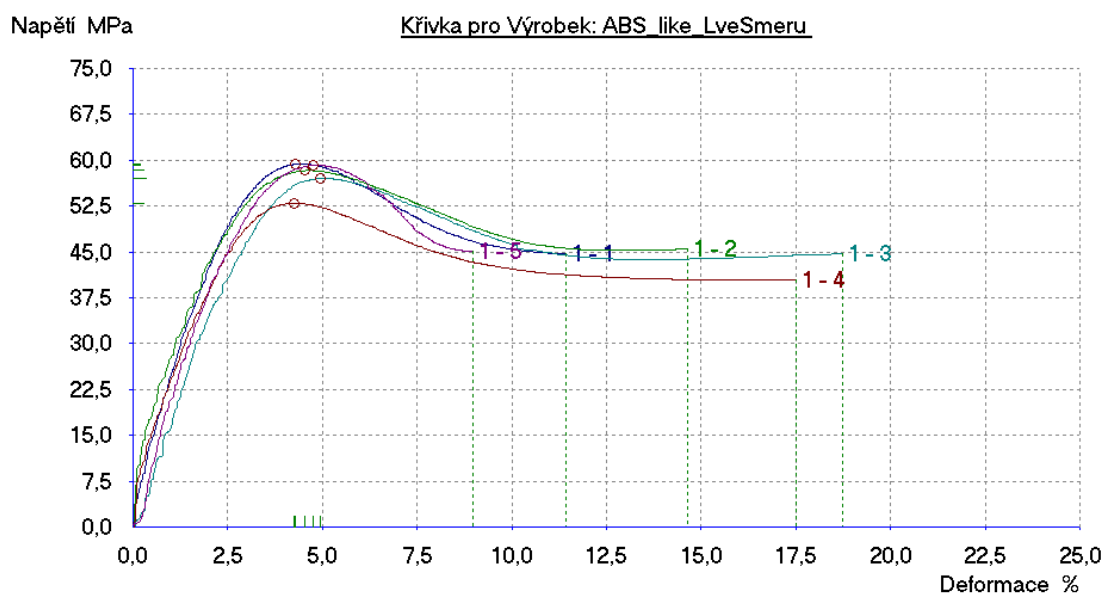
n – počet vzorku. [33]

Po provedení tahové zkoušky, viz. obr. 5.15, při použití materiálu bez následných úprav lze z výsledné tabulky 5.1 vyčíst, že při tisku podélně ve směru jízdy tiskové hlavy, viz graf.5.3, se maximální síla F_{\max} pohybuje v rozmezí 2120 – 2375[N], přičemž prodloužení při maximální síle je v rozmezí 4,24 – 4,95[%]. Z toho vyplývá, že vzájemná soudržnost makromolekul v polymerním vzorku zjišťující jeho pevnost zabraňuje větším deformací a to až do napětí (R_m), které rozruší fyzikální vazby mezi makromolekulami a umožní tak jejich orientaci. Tento pohyb se vyznačuje poklesem napětí, které je v další fázi tahové zkoušky nutný pro deformaci zkušebního tělesa a to až do jeho přerušení. Naměřená hodnota pevnosti v tahu R_m vyšla v rozmezí 53,00-59,38[MPa]. Modul pružnosti je od 1125 až 6344[MPa]. Přetrhnutí bylo dosaženo při působení síly nad 1620,00[N] a napětí 4050[MPa].



Obr. 5.15 Umístění zkoušebních těles v čelistech trhacího zařízení
při realizaci zkoušky tahem

Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných podélně na plochu ve směru jízdy
tiskové hlavy tiskárny OBJET Connex 500



Graf. 5.3 Pracovní diagram zkoušky tahem

Tab. 5.1 Výsledné hodnoty zkoušky tahem

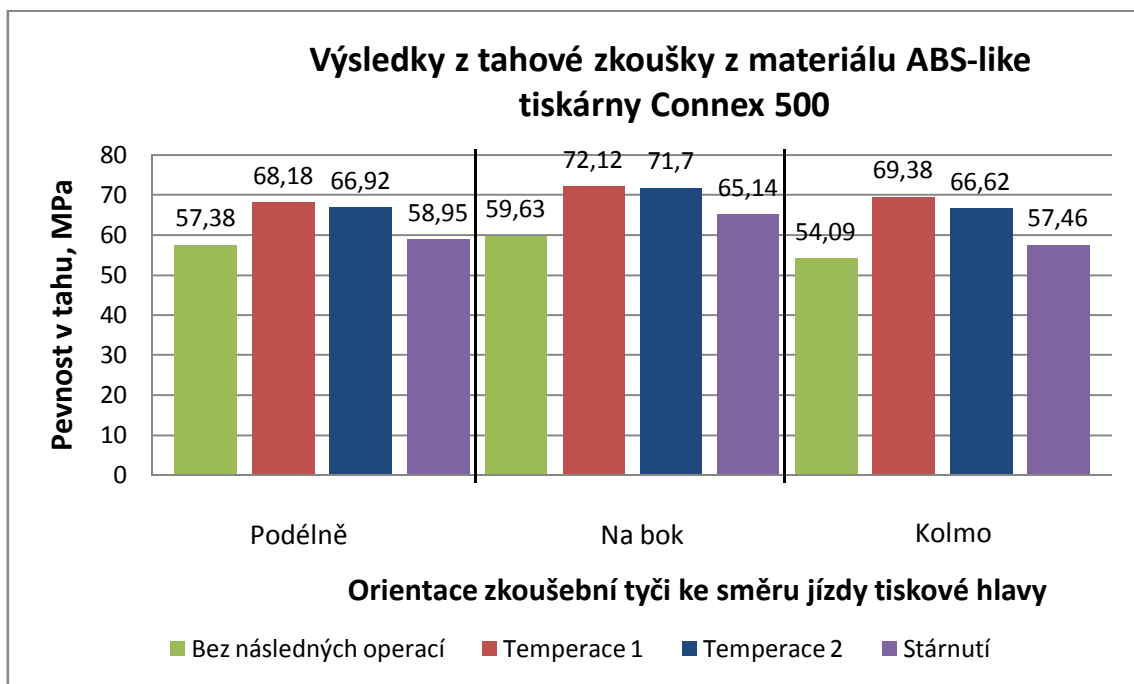
Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu, [MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2375,00	59,38	3013	4,28	11,44	44,75	1 790,00
2	2 332,50	58,31	6344	4,54	14,64	45,44	1 817,50
3	2 280,00	57,00	1125	4,95	18,73	44,75	1 790,00
4	2 120,00	53,00	4750	4,24	17,50	40,50	1 620,00
5	2 367,50	59,19	3012	4,76	8,98	45,06	1 802,50
Rozmezí	2120- 2375	53,00- 59,38	1125- 6344	4,24- 4,95	8,98- 18,73	40,50- 45,44	1620,00- 1 817,50
Stř.hodn.± směr.odch.	2295,00± 104,78	57,38± 2,62	3649± 1978	4,55± 0,31	14,26± 4,07	44,10± 2,03	1764,00± 81,29

Tab. 5.2 Shrnutí výsledků zkoušek dle materiálu ABS-like tiskárny Connex 500

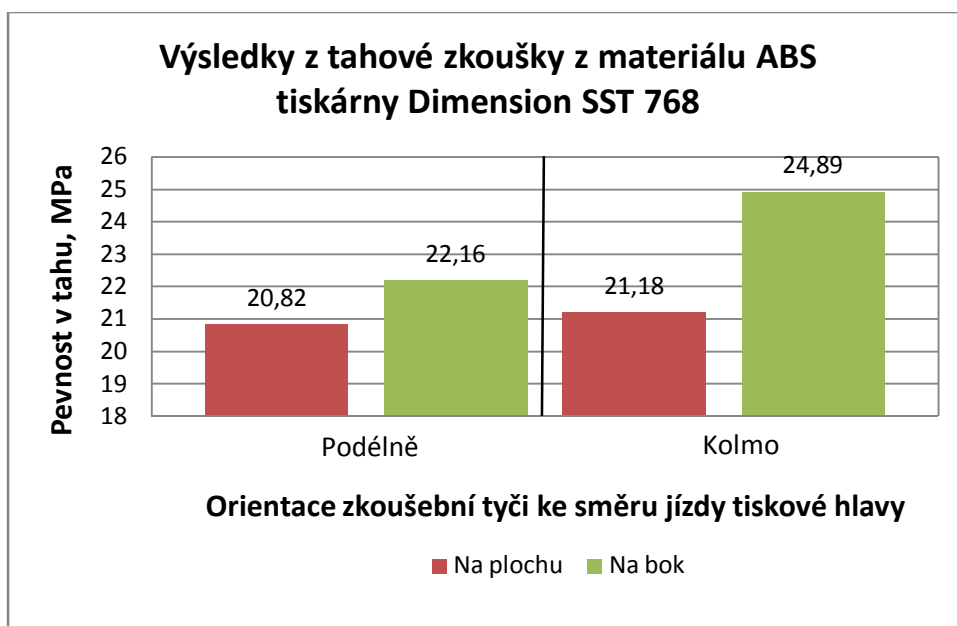
Tisk	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E, [MPa]	A v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu, [MPa]	Síla ve zlomu, [N]
Bez následných operací							
Podélně	2295,00± 104,78	57,38± 2,62	3649± 1978	4,55± 0,31	14,26± 4,07	44,10± 2,03	1764,00± 81,29
Na bok	2385,00± 37,42	59,63± 0,94	3827± 1385	4,51± 0,15	18,20± 10,50	47,16 ± 3,04	1886,50± 121,70
Kolmo	2163,50± 28,65	54,09± 0,72	3339± 2111	4,38± 0,28	14,28± 7,51	43,75± 2,36	1750,00± 94,37
Po temperaci 1							
Podélně	2727,20± 75,44	68,18± 1,89	3127± 1367	5,00± 0,20	6,82± 1,15	65,30± 2,24	2612,00± 89,49
Na bok	2884,80± 40,93	72,12± 1,02	3367± 2397	4,79± 0,30	8,74± 0,81	62,64± 2,42	2505,60± 96,73
Kolmo	2775,20± 17,30	69,38± 0,43	2880± 382	4,83± 0,13	6,59± 1,05	66,28± 2,15	2651,20± 86,13
Po temperaci 2							
Podélně	2676,80± 16,83	66,92± 0,42	4639± 2909	4,77± 0,31	6,89± 1,67	63,12± 3,90	2524,80± 156,11
Na bok	2868,00± 7,48	71,70± 0,19	3854± 1764	4,74± 0,28	8,65± 1,57	62,82± 3,93	2512,80± 157,21
Kolmo	2664,80± 0,73	66,62± 0,27	3445± 1318	4,81± 0,15	7,53± 1,34	59,96± 6,57	2398,40± 262,86
Po stárnutí							
Podélně	2358,00± 47,84	58,95± 1,20	2750± 770	4,30± 0,11	7,91± 2,79	51,18± 6,34	2047,00± 253,41
Na bok	2605,60± 6,69	65,14± 0,17	4508± 2775	3,98± 0,21	9,16± 2,46	51,82± 5,50	2072,80± 220,15
Kolmo	2298,50± 20,28	57,46± 0,51	5096± 2129	4,02± 0,20	8,63± 2,20	47,88± 4,47	1915,00± 178,75

Tab. 5.3 Shrnutí výsledků zkoušek dle materiálu ABS tiskárny Dimension SST 768

Tisk	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E, [MPa]	A v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu, [MPa]	Síla ve zlomu, [N]
Bez následných operací							
Podélně na plochu	832,87± 50,78	20,82± 1,27	1147± 932	1,16± 0,19	1,16± 0,19	20,82± 1,27	832,87± 50,78
Pod.na bok	886,47± 22,07	22,16± 0,55	2249± 365	1,48± 0,32	2,47± 0,79	20,31± 1,75	812,28± 69,98
Kolmo na plochu	847,00± 11,94	21,18± 0,30	2628± 353	2,03± 0,08	3,52± 0,87	20,27± 0,69	810,60± 27,46
Kolmo na bok	995,55± 16,45	24,89± 0,41	2249± 365	1,70± 0,11	9,71± 2,50	20,88± 0,41	837,30± 17,75



Obr. 5.15 Výsledky z tahové zkoušky z materiálu ABS-like tiskárny Connex 500



**Obr. 5.16 Výsledky z tahové zkoušky z materiálu ABS
tiskárny Dimension SST 768**

Zhodnocení výsledků

Z výsledných hodnot vyplývá, že při tisku technologií PolyJet a FDM má na mechanické vlastnosti zásadní vliv orientace modelu, jak lze vidět z výsledků znázorněných v tabulkách tab. 5.17 a tab. 5.18 a ve výsledném grafu na obrazech obr. 5.15 a obr. 5.16. Při porovnání výsledků tiskáren Connex 500 a Dimension 768 bylo znatelně lepších výsledků dosaženo při použití zkušebních tělísek zhotovených na tiskárně Connex 500, které vykazovaly mnohem větší homogenitu. Z výsledků trhací zkoušky materiálu ABS při technologii FDM je vidět, že umístění zkušební tyče na bok má lepší pevnost v tahu, jak při orientace podélně, tak i kolmo na směr jízdy tiskové hlavy.

Ze tří použitých orientací nastavených při 3D tisku materiálu ABS-like technologií PolyJet Matrix vychází s nejlepšími mechanickými vlastnostmi nanesení vrstev ve směru jízdy tiskové hlavy podélně na bok. Tato orientace u obou způsobů tisku vykazovala vyšší pevnost než tělíska vyrobená při pohybu hlavy 3D tiskárny podélně na plochu či kolmo. Dalo by se to vysvětlit větším počtem překrývajících se vrstev a polohou vrstvy ve vztahu k zatěžovací síle.

Část výrobků byla vystavená následným operacím. Z výsledného diagramu je vidět, že všechny zušlechťující operace při tisku na tiskárně Connex 500 mají vliv na vlastnosti zkušebních těles. Stejně chování materiálu je u nevystavených následným operacím vzorků, tak i u vystavených jakékoli temperaturaci nebo přirozenému stárnutí. Z toho můžeme odvodit, že při pro nějaký účel vyhovujících hodnotách pevnosti v tahu (alespoň přibližně do 50 MPa) můžeme díl vytisknout v libovolném směru a bez žádných doplňkových operací a toto namáhání vydrží. Když je zapotřebí větších hodnot pevnosti v tahu u vytištěného výrobku, tak je potřeba tento výrobek umístit určitým způsobem k směru jízdy tiskové hlavy, v kterém směru bude více namáhán. Když je potřeba u výrobku mít požadovanou pevnost v tahu až o 20% větší, než je počáteční, tak je třeba tento výrobek vystavit temperaturaci buď dle varianty 1, nebo varianty 2, a to platí pro všechny způsoby tisku.

Při porovnání s mechanickými vlastnostmi, které zaručuje výrobce, uvedené v tab. 2.2 pro materiál ABS je vidět, že při provedení zkoušky jsme nedosáhly předepsaných hodnot výrobcem: pevnost v tahu by měla ležet v oblasti 35 MPa, když v naší laboratoři

při splnění všech norem a podmínek pro přípravu, výrobu zkušebních tyčí a provedení zkoušek tahem nám vyšla nejvyšší hodnota pevnosti v tahu kolem 25 MPa při orientaci modelu na bok kolmo na směr jízdy tiskové hlavy. Při orientaci modelu ostatními směry hodnota tahové pevnosti klesá až o 40% od uvedené výrobcem.

Při porovnání charakteristik materiálu ABS-like, získaných vlastní zkouškou v laboratoři s uvedenými výrobcem v tab. 2.4, je vidět že všechny hodnoty odpovídají uvedeným, až na hodnotu, získanou orientací tyčí kolmo na směr jízdy tiskové hlavy, která je nižší než uvedená jen o 2%. Ostatní hodnoty i bez následných operací odpovídají uvedeným hodnotám výrobcem při libovolné orientaci modelu vůči směru jízdy tiskové hlavy, a po temperacích jejich hodnoty pevnosti v tahu při určité orientaci modelu na pracovní ploše jsou vyšší o 20%.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zpracovat přehled a aplikaci dvou základních technologií Rapid Prototyping FDM a PolyJet Matrix, které jsou používány při metodě 3D tisku.

V první části práci je popsána stručná historie vývoje každé metody, jejich princip a také popis jednotlivých fází výroby prototypu. Také jsou uvedeny klady a zápory uvedených metod. Jsou zde představeny technologické informace k tiskárnám a charakteristiky použitých materiálů, zaručujících výrobcí. Jsou také popsány kroky stanovené normou pro výrobu zkušební tělesa a provádění tahové zkoušky pro zjištění vlivu různých jednotlivých nastavení tisku na mechanické vlastnosti materiálu. Pod nastavením tisku se tady počítala celá etapa preprocessing, zahrnující výrobu zkušební tělesa od fáze získávání a tvorby dat přes jejich převod do formátu STL, popis pracovního postupu v programu Connex OBJET a CatalystEX, a nastavení orientací těles k směru nanášení jednotlivých vrstev materiálu. Dále je popsán postup provedení tahové zkoušky připravených těles na stroji HOUNSFIELD H10KT, na kterém byly uskutečněny vlastní mechanické zkoušky materiálů, detailně popsané v praktické části diplomové práci. Část dílů, ve fázi postprocessing byla vystavená následným operacím, také byla otestovaná pomocí tahové zkoušky na následnou změnu mechanických vlastností materiálu. Dále bylo provedeno porovnání jednotlivých variant nastavení tiskových parametrů dle výsledných hodnot, podle kterého vychází, že orientace modelu při tisku má vliv na hodnotu tahové pevnosti materiálu a určitou orientací se dosáhlo 10% zvýšení jejich hodnot. Následné operace, použité po stavbě zkušebních těles, měly další vliv na zvýšení hodnot tahové pevnosti až o 20%.

Výsledná data dosažená v této práci mohou být dále užitečná pro výrobu prototypů metodou 3D tisku pomocí tiskáren Dimension SST768 a Connex 500. Výsledky jsou důležité pro zvolení orientace modelu na pracovní desce vůči jízdě tiskové hlavy a následně i směru nanášení vrstev, co v podstatě může výrazně ovlivnit pevnost v tahu vyrobeného modelu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DRÁPELA, M. *Modul Rapid Prototyping* [online]. 2007 [cit. 2012-2-02]. Dostupné z WWW: <http://www.vu.vutbr.cz/digidesign/Moduly/Rapid%20Prototyping%20-%20Ing.%20Milosvav%20Dr%C3%A1pela.pdf>
- [2] NĚMEC, J. *Přehled moderních metod při výrobě prototypových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2010. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [3] C.M. CHEAH, C.K. CHUA, C.W. LEE, C. FENG and K. TOTONG. *Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Springer London, 2003. Volume 25, č. 3-4, 308-320s. ISSN 0268-3768
- [4] MCAE Systems. *Rapid prototyping*. [online] 2012 [cit. 2012-02-04]. Dostupné z WWW: <http://www.mcae.cz>
- [5] GOULDSSEN, C., BLAKE, P. *Investment Casting Using FDM/ABS. Rapid Prototype Patterns*. [online] 22.06.98 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z WWW: http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=investment%20casting%20using%20fdm%20Fabs%20rapid%20prototype%20patterns.&source=web&cd=1&ved=0CHUQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ditra.biz%2Fpls%2Fhtmldb%2FTL_PORTAL.tl_portal_utils.download_doc%3Fp_file_id%3D81&ei=cvOT77PCismV-waCo9SvCg&usg=AFQjCNG00EcpkCpCeRXnLCRc7aBiVsIsXg.
- [6] CIESLAR, B. *Zkušební metody kompozitních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2008. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Josef Klement, CSc.
- [7] ČSN EN ISO 527-1(640604)
- [8] WIKIPEDIE. *Быстрое прототипирование* [online]. 23.11.2011 [cit. 2012-02-10]. Dostupné z WWW: http://ru.wikipedia.org/wiki/Быстрое_прототипирование
- [9] Midgart. *История* [online]. 2011 [cit. 2012-02-10]. Dostupné z WWW: <http://www.midgart.ru/history.html>
- [10] CHUA, LEONG, LIM. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3rd edition. Hardcover : [s.n.], 2008. 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

- [11] PANDEY, P. M. *Rapid Prototyping technologies, applications and part deposition planning* [online]. [cit. 2012-02-20]. Dostupné z WWW: <http://web.iitd.ac.in/~pmpandey/MEL120_html/RP_document.pdf>
- [12] VACULÍK, M. *Rapid Prototyping*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati. Fakulta technologická. 2011. 63 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Staněk, Ph.D.
- [13] ŠMÍD, J. *Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2011. 94 s. Vedoucí bakalářské práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [14] ROUPEC, J. *Zařízení pro vakuové lití do silikonových forem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2007. 107 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek.
- [15] WIKIPEDIE
- [16] WTEC. *Rapid Prototyping in Europe and Japan* [online]. 1997 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.wtec.org/loyola/rp/toc.htm>>.
- [17] GEBHART, A.: *Rapid Prototyping*. 1. vyd. Munich: Carl Hanser Verlag, 2003. ISBN 1-56990-281-X
- [18] *Aditivní technologie – metody Rapid Prototyping*. [prezentace]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM-FS/Aditivni%20technologie%20pro%20studenty.pdf>>.
- [19] ROZINEK, J. *Využití metod Rapid Prototyping při vývoji nového výrobku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2009. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Zouhar.
- [20] REJŽEK, J. *Konstrukce a výroba podvozku rádiem řízeného modelu auta s využitím moderních technologií*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2011. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
- [21] *Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2012-04-02]. Dostupné z WWW: <http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf>.
- [22] *Konstrukční materiály* [online]. [cit. 2012-04-02]. Dostupné z WWW: <<http://vyuka.fel.zcu.cz/ket/EMAP/Cviceni/2.%20cviceni/Mechanick%E9%20zkou%9Aky%20pevn%FDch%20materi%E1l%F9.pdf>>.
- [23] ZELENÝ, P. *Zpracování dat pro výrobu* [prezentace]. 2011 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z WWW: <educum.tul.cz/getFile/case:get/id:14670>.

- [24] POKORNÝ, P., ŠAFKA, J. *Laboratoř prototypových technologií a procesů* [prezentace]. 2012 [cit. 2012-04-24].
- [25] *Statické zkoušky* [online]. [cit. 2012-04-27]. Dostupné z WWW:
<<http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>>.
- [26] *Thermal Treatment for Parts Made of Objet RGD5160-DM ABS-like Material* [online]. [cit. 2012-02-25]. Dostupné z WWW:
<http://www.objet.com/Portals/0/docs2/DOC-08269_D_RGD5160-DM_Thermal-Treatment+.pdf>.
- [27] WIKIPEDIE. *Pružnost* [online]. 21.04.2012 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Pru%C5%BEnost>>.
- [28] MEGAMODO [online]. 29.05.2006 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z WWW:
<<http://www.megamodo.com/20064039-stampanti-3d-dimension-768-utilizzato-il-nuovo-software-catalyst-ex/>>.
- [29] *Odolnost plastů vůči stárnutí a degradaci recyklace* [prezentace]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z WWW:
<http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=proces%20starnuti%20plastu&source=web&cd=1&ved=0CGEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.kmt.tul.cz%2Fedu%2Fpodklady_kmt_magistri%2FNEkM%2FNeM%2520Kro%2F0dolnost%2520plastu%2520vuci%2520starnuti%2520a%2520degradaci%2520recyklace.ppt&ei=vVCxT7ylDcmQ-wbkzbzyCA&usg=AFQjCNG7N8CLrycS3nSkNmdzD2EY1lQnKg>.
- [30] STANDOTHEK. *Plasty a jejich lakování* [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z WWW:
<http://www.servind.cz/media/document/1222959419_plasty-a-jejich-lakovani.pdf>.
- [31] CORITAR, D. *Vliv oxidačního stárnutí na fyzikálně-chemické a mechanické vlastnosti polymerních materiálů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati. Fakulta technologická. 2010. 95 s. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D.
- [32] CHOTĚBORSKÝ, R. *Stárnutí konstrukčních materiálů*. MM Průmyslové spektrum [online]. 14.06.2006, s. 67 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/starnuti-konstrukcnich-materialu.html>>.
- [33] WIKIPEDIE. *Směrodatná odchylka*. [online] 15.02.2012 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Sm%C4%9Brodavn%C3%A1_odchylka>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Schéma postupu výroby prototype	9
Obr. 2.1 Rozdělení modelu do jednotlivých vrstev.....	14
Obr. 2.2 Postup při výrobě modelu	15
Obr. 2.3 Vliv počtu trojúhelníčku při modelování povrchu koule.....	16
Obr. 2.4 STL interpolace CAD modelu.....	16
Obr. 2.5 Výroba prototypu metodou FDM.....	19
Obr. 2.6 3D tiskárna Dimension SST 768	19
Obr. 2.7 Princip technologie PolyJet Printing.....	21
Obr. 2.8 3D tiskárna OBJET Connex 500	22
Obr. 2.9 Materiál, vhodný pro tisk pomocí PolyJet Matrix	23
Obr. 3.1 Tvar zkušebních tyčí pro zkoušku tahem.....	25
Obr. 3.2 Pracovní diagram z tahové zkoušky.....	27
Obr. 4.1 Zkušební těleso typ 1A a1B.....	29
Obr. 5.1 Zkušební tyč typu 1B, vytvořená v programu ProEngineer	32
Obr. 5.2 Zkušební tyč, převedená do formátu STL.....	32
Obr. 5.3 Nastavení základních hodnot pro tisk	34
Obr. 5.4 Orientace tyče na pracovní desce tiskárny Dimension SST 768.....	34
Obr. 5.5 Zobrazení průřezů modelu	35
Obr. 5.6 Znázornění podélného řezu jednotlivé vrstvy	35
Obr. 5.7 Zobrazení rozmístění zkušebních tyčí na ploše, orientovaných různými způsoby dle směru jízdy tiskové hlavy	36
Obr. 5.8 Zobrazení procesu tisku na Dimension SST 768	37
Obr. 5.9 Detail směru nanesení vrstev při umístění tyče.....	38
Obr. 5.10 Nahraná data zkušební tyče do softwaru Objet Studio	39
Obr. 5.11 Orientace zkušebních tyčí na pracovní desce v softwaru Objet Studio	39
Obr. 5.12 Proces 3D tisku tiskárnou Connex 500.....	40
Obr. 5.13 Detail směru nanesení vrstev při umístění tyče	40
Obr. 5.14 Umístění zkušebních tyčí, vystavených procesu temperace	41
Obr. 5.15 Umístění zkoušebních těles v čelistech trhacího zařízení při realizaci zkoušky tahem	46

Obr. 5.16 Výsledky z tahové zkoušky z materiálu ABS-like tiskárny Connex 500	50
Obr. 5.17 Výsledky z tahové zkoušky z materiálu ABS tiskárny Dimension SST 768.....	50

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Technické informace k 3D tiskárně Dimension SST 768.....	20
Tab. 2.2 Charakteristiky materiálu ABS pro tiskárnu Dimension SST 768.....	20
Tab. 2.3 Technické informace k 3D tiskárně OBJET Connex 500.....	22
Tab. 2.4 Charakteristiky materiálu ABS-like	23
Tab. 4.1 Rozměry zkušebních těles a rozvržení zkoušky	29
Tab. 5.1 Výsledné hodnoty zkoušky tahem	47
Tab. 5.2 Shrnutí výsledků zkoušek dle materiálu ABS-like tiskárny Connex 500.....	48
Tab. 5.3 Shrnutí výsledků zkoušek dle materiálu ABS tiskárny Dimension SST 768...	49

SEZNAM GRAFŮ

Graf 5.1 Průběh teploty 1	42
Graf 5.2 Průběh teploty 2.....	43
Graf 5.3 Pracovní diagram zkoušky tahem	47

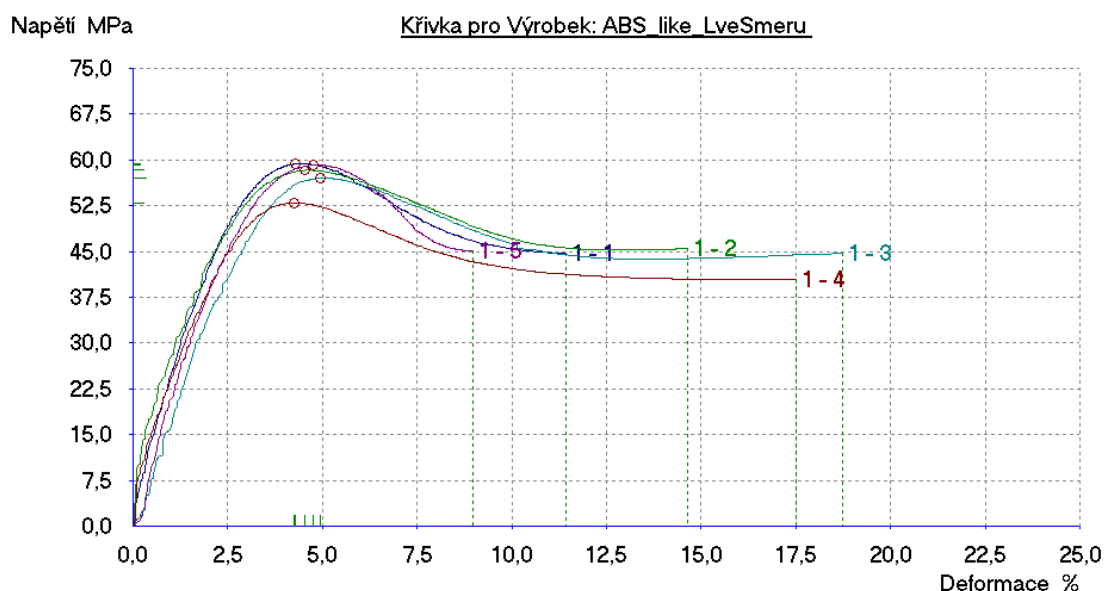
SEZNAM PŘÍLOH

Počet stran

Příloha 1. Výsledná data ze zkoušky tahem těles, vytištěných na tiskárně Connex 500.....	12
Příloha 2. Výsledná data ze zkoušky tahem těles, vytištěných na tiskárně Dimension SST 768	4

Příloha 1. Výsledná data ze zkoušky tahem těles, vytištěných na tiskárně Connex 500

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných podélně ve směru jízdy tiskové hlavy
tiskárny OBJET Connex 500**

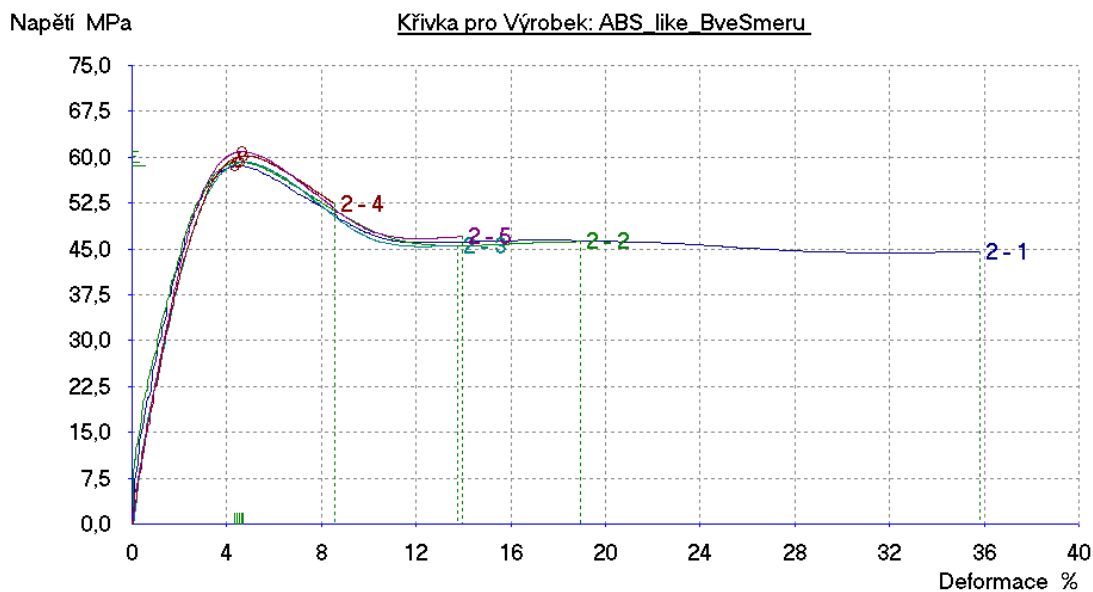


Graf. 1 Pracovní diagram zkoušky tahem

Tab. 1 Výsledné hodnoty zkoušky tahem

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu,[MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2375,00	59,38	3013	4,28	11,44	44,75	1 790,00
2	2 332,50	58,31	6344	4,54	14,64	45,44	1 817,50
3	2 280,00	57,00	1125	4,95	18,73	44,75	1 790,00
4	2 120,00	53,00	4750	4,24	17,50	40,50	1 620,00
5	2 367,50	59,19	3012	4,76	8,98	45,06	1 802,50
Rozmezí	2120- 2375	53,00- 59,38	1125- 6344	4,24- 4,95	8,98- 18,73	40,50- 45,44	1620,00- 1 817,50
Stř.hodn.± směr.odch.	2295,00± 104,78	57,38± 2,62	3649± 1978	4,55± 0,31	14,26± 4,07	44,10± 2,03	1764,00± 81,29

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných na bok podélně ve směru jízdy tiskové
hlavy tiskárny OBJET Connex 500**

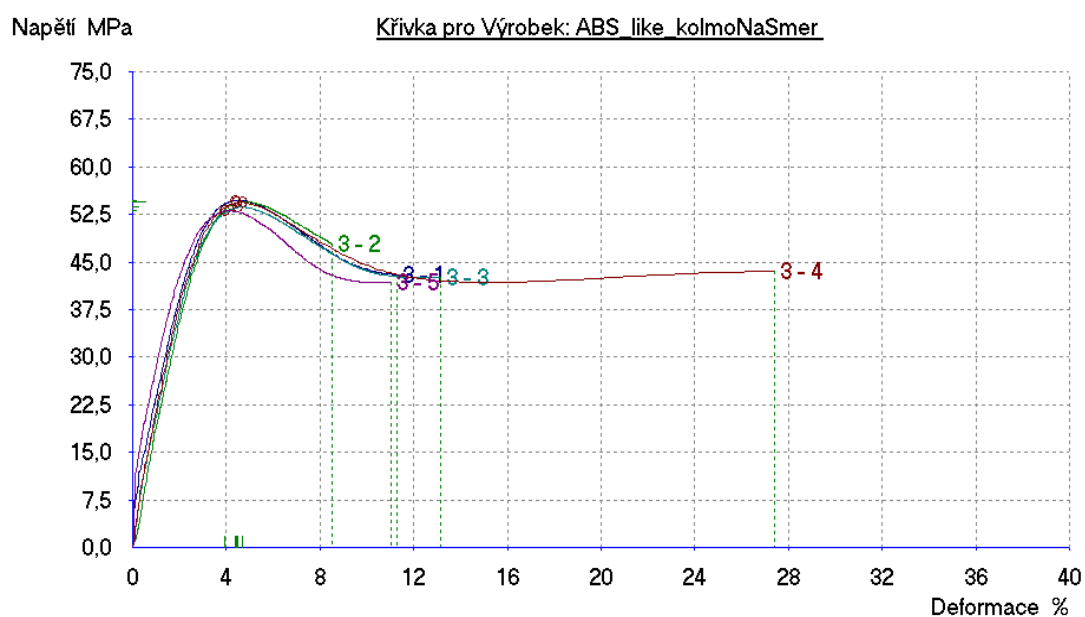


Graf. 2 Pracovní diagram zkoušky tahem

Tab. 2 Výsledné hodnoty zkoušky tahem

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	$A_v \max$, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu, [MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2 342,50	58,56	4625	4,32	35,80	44,63	1 785,00
2	2 370,00	59,25	5875	4,43	18,92	46,25	1 850,00
3	2 367,50	59,19	2594	4,52	13,74	45,56	1 822,50
4	2 407,50	60,19	2917	4,68	8,58	52,38	2 095,00
5	2 437,50	60,94	3125	4,62	13,96	47,00	1 880,00
Rozmezí	2342,50- 2 437,50	58,56- 60,94	2594- 5875	4,32- 4,68	8,58- 35,80	44,63- 52,38	1785,00- 2095,00
Sř.hodn.± směr.odch.	2385,0± 37,42	59, 63± 0,94	3827± 1385	4,51± 0,15	18,20± 10,50	47,16 ± 3,04	1886,5± 121,70

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných kolmo na směr jízdy tiskové hlavy
tiskárny OBJET Connex 500**

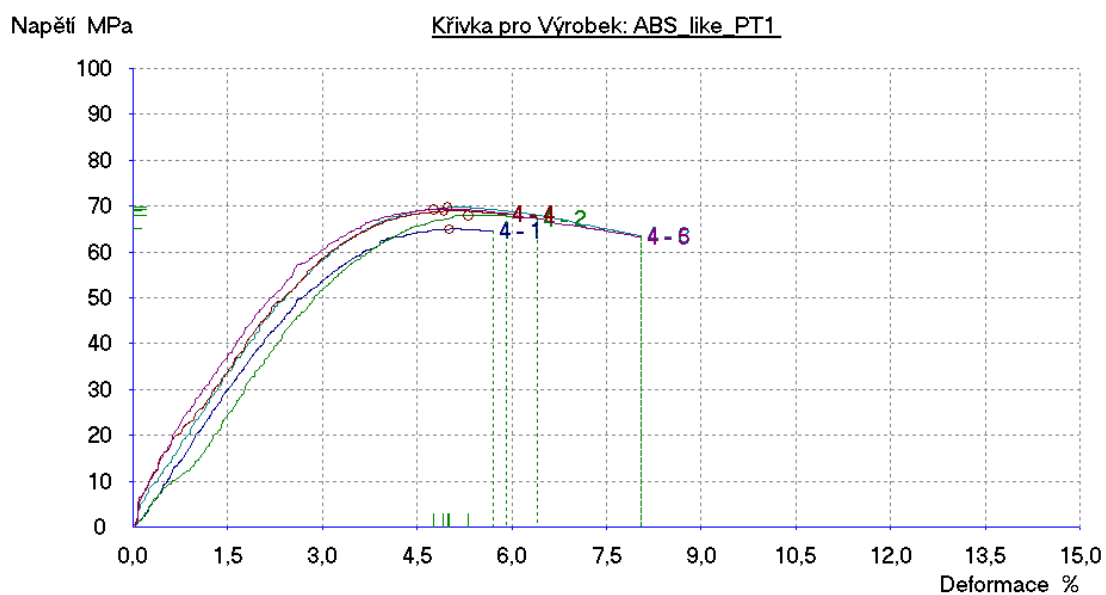


Graf. 3 Pracovní diagram zkoušky tahem

Tab. 3 Výsledné hodnoty zkoušky tahem

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu,[MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2 190,00	54,75	3526	4,38	11,30	43,00	1 720,00
2	2 182,50	54,56	1154	4,68	8,53	47,81	1 912,50
3	2 145,00	53,63	2625	4,48	13,16	42,56	1 702,50
4	2 177,50	54,44	2594	4,44	27,40	43,56	1 742,50
5	2 122,50	53,06	6795	3,91	11,02	41,81	1 672,50
Rozmezí	2122,50- 2 190,00	53,06- 54,75	1154- 6795	3,91- 4,68	8,53- 27,40	41,81- 47,81	1672,50- 1 912,50
Stř.hodn.± směr.odch.	2163,50± 28,65	54,09± 0,72	3339± 2111	4,38± 0,28	14,28± 7,51	43,75± 2,36	1750,00± 94,37

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných podélně ve směru jízdy tiskové hlavy
tiskárny OBJET Connex 500 a vystavených teplotaci 1**

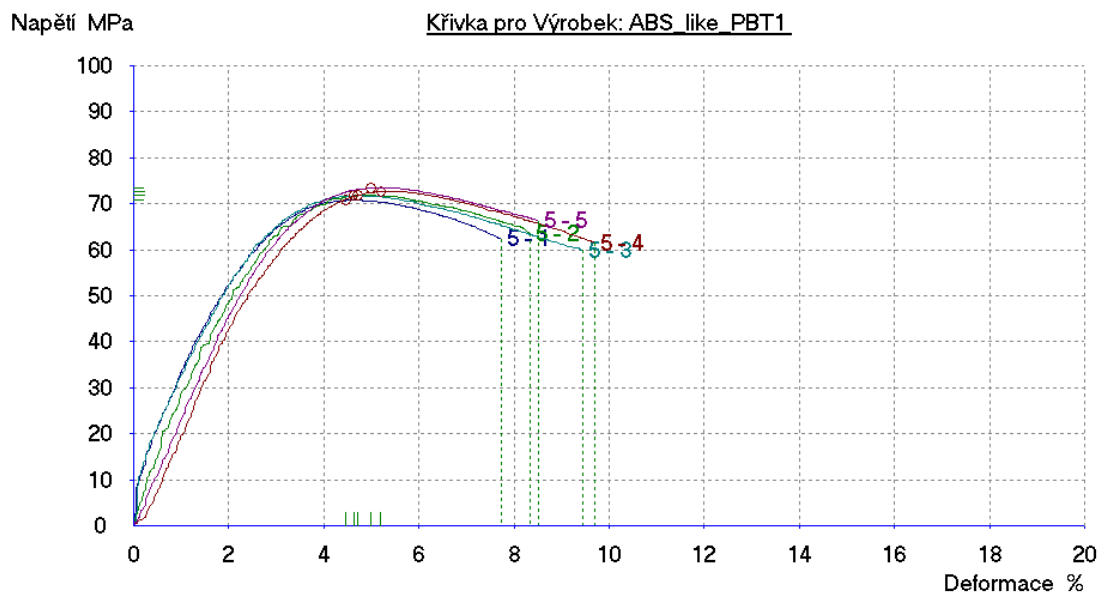


Graf. 4 Pracovní diagram zkoušky tahem po teplotaci 1

Tab. 4 Výsledné hodnoty zkoušky tahem po teplotaci 1

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu, [MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2 600,00	65,00	1850	5,01	5,70	64,60	2 584,00
2	2 720,00	68,00	1487	5,31	6,41	67,20	2 688,00
3	2 788,00	69,70	3641	4,98	8,04	63,50	2 540,00
4	2 756,00	68,90	4300	4,92	5,92	68,10	2 724,00
5	2 772,00	69,30	4359	4,76	8,06	63,10	2 524,00
Rozmezí	2600,00- 2788,00	65,00- 69,70	1487- 4359	4,76- 5,31	5,70- 8,06	63,10- 68,10	2 524,00- 2 724,00
Stř.hodn.± směr.odch.	2727,20± 75,44	68,18± 1,89	3127± 1367	5,00± 0,20	6,82± 1,15	65,30± 2,24	2612,00± 89,49

Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných na bok podélně ve směru jízdy tiskové hlavy tiskárny OBJET Connex 500 a vystavených teplotaci 1

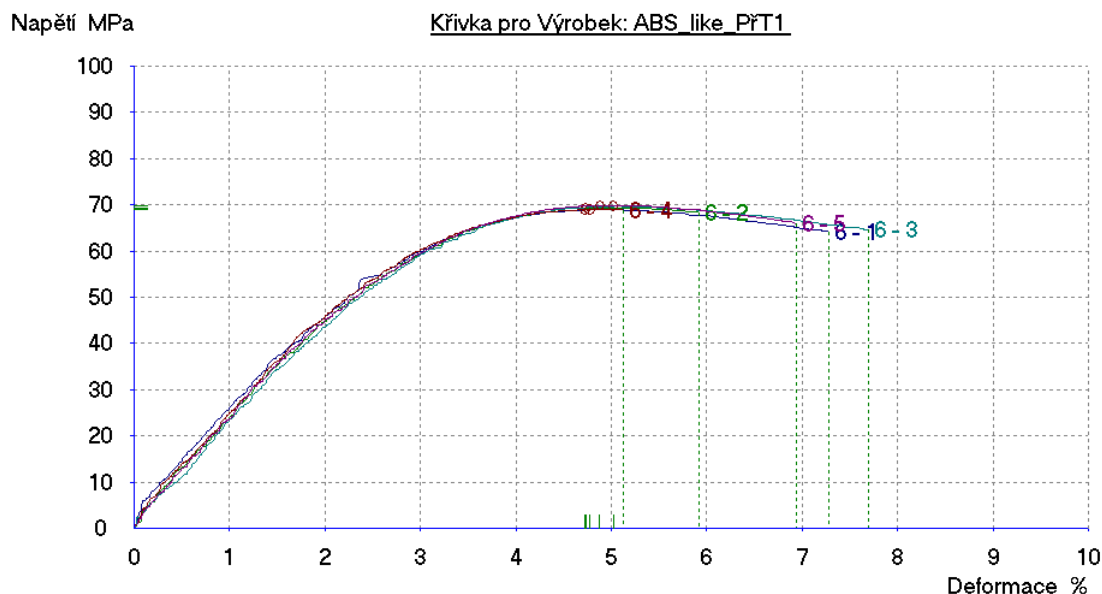


Graf. 5 Pracovní diagram zkoušky tahem po teplotaci 1

Tab. 5 Výsledné hodnoty zkoušky tahem po teplotaci 1

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu, [MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2 832,00	70,80	4513	4,45	7,74	62,20	2 488,00
2	2 872,00	71,80	2974	4,71	8,32	63,60	2 544,00
3	2 872,00	71,80	6827	4,62	9,44	59,80	2 392,00
4	2 908,00	72,70	677	5,20	9,70	61,40	2 456,00
5	2 940,00	73,50	1846	4,98	8,52	66,20	2 648,00
Rozmezí	2832,00- 2 940,00	70,80- 73,50	677- 6827	4,45- 5,20	7,74- 9,70	59,80- 66,20	2392,00- 2 648,00
Stř.hodn.± směr.odch.	2884,80± 40,93	72,12± 1,02	3367± 2397	4,79± 0,30	8,74± 0,81	62,64± 2,42	2505,60± 96,73

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných kolmo na směr jízdy tiskové hlavy
tiskárny OBJET Connex 500 a vystavených teplotaci 1**

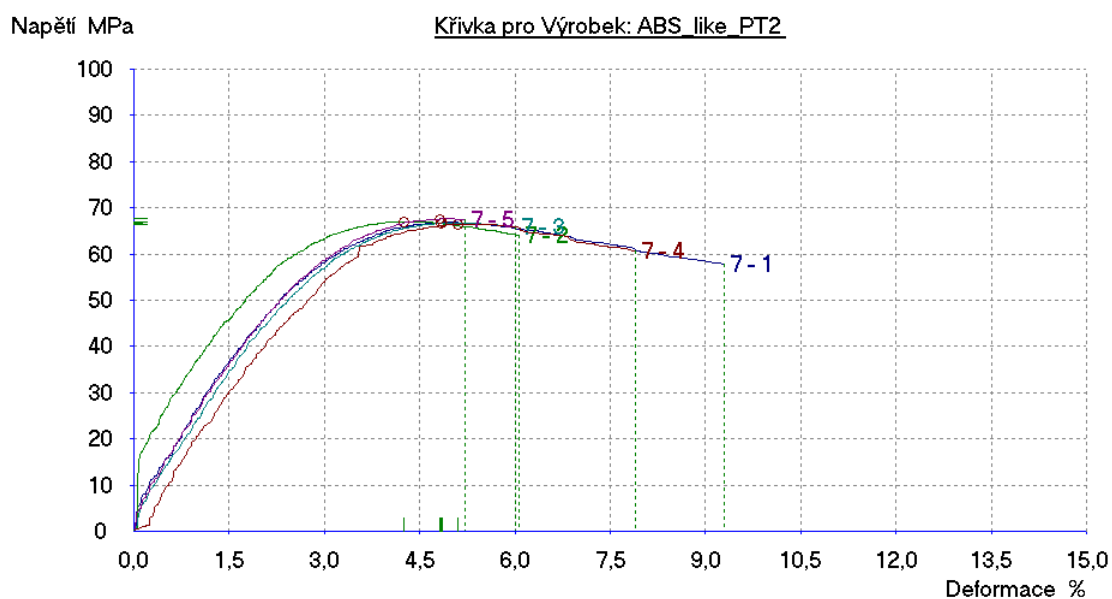


Graf. 6 Pracovní diagram zkoušky tahem po teplotaci 1

Tab. 6 Výsledné hodnoty zkoušky tahem po teplotaci 1

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu,[MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2 756,00	68,90	2800	4,72	7,28	64,00	2 560,00
2	2 776,00	69,40	3300	4,73	5,92	68,20	2 728,00
3	2 788,00	69,70	2350	5,02	7,70	64,50	2 580,00
4	2 760,00	69,00	3200	4,78	5,12	68,80	2 752,00
5	2 796,00	69,90	2750	4,88	6,94	65,90	2 636,00
Rozmezí	2756,00- 2 796,00	68,90- 69,90	2350- 3300	4,72- 5,02	5,12- 7,70	64,00- 68,80	2560,00- 2 752,00
Stř.hodn.± směr.odch.	2775,20± 17,30	69,38± 0,43	2880± 382	4,83± 0,13	6,59± 1,05	66,28± 2,15	2651,20± 86,13

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných podélně ve směru jízdy tiskové hlavy
tiskárny OBJET Connex 500 a vystavených teplotaci 2**

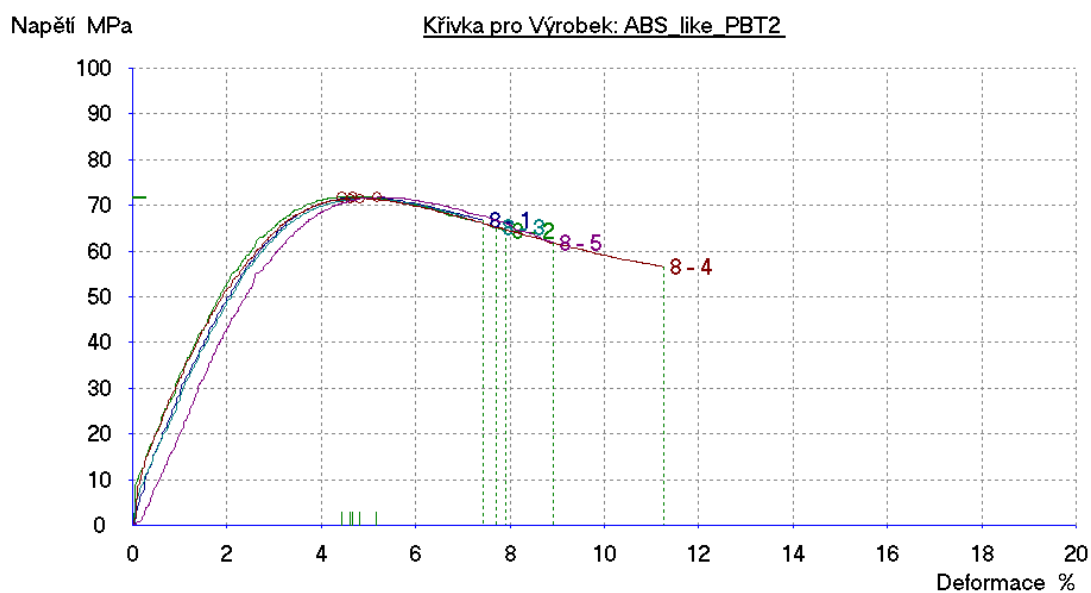


Graf. 7 Pracovní diagram zkoušky tahem po teplotaci 2

Tab. 7 Výsledné hodnoty zkoušky tahem po teplotaci 2

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu,[MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2 672,00	66,80	3385	4,86	9,30	57,80	2 312,00
2	2 680,00	67,00	9750	4,25	6,06	64,00	2 560,00
3	2 668,00	66,70	3800	4,84	6,00	65,80	2 632,00
4	2 660,00	66,50	3800	5,10	7,91	60,60	2 424,00
5	2 704,00	67,60	2462	4,82	5,20	67,40	2 696,00
Rozmezí	2660,00- 2 704,00	66,50- 67,60	2462- 9750	4,25- 5,10	5,20- 9,30	57,80- 67,40	2312,00- 2 696,00
Sř.hodn.± směr.odch.	2676,80± 16,83	66,92± 0,42	4639± 2909	4,77± 0,31	6,89± 1,67	63,12± 3,90	2524,80± 156,11

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných na bok podélně ve směru jízdy tiskové
hlavy tiskárny OBJET Connex 500 a vystavených teplotaci 2**

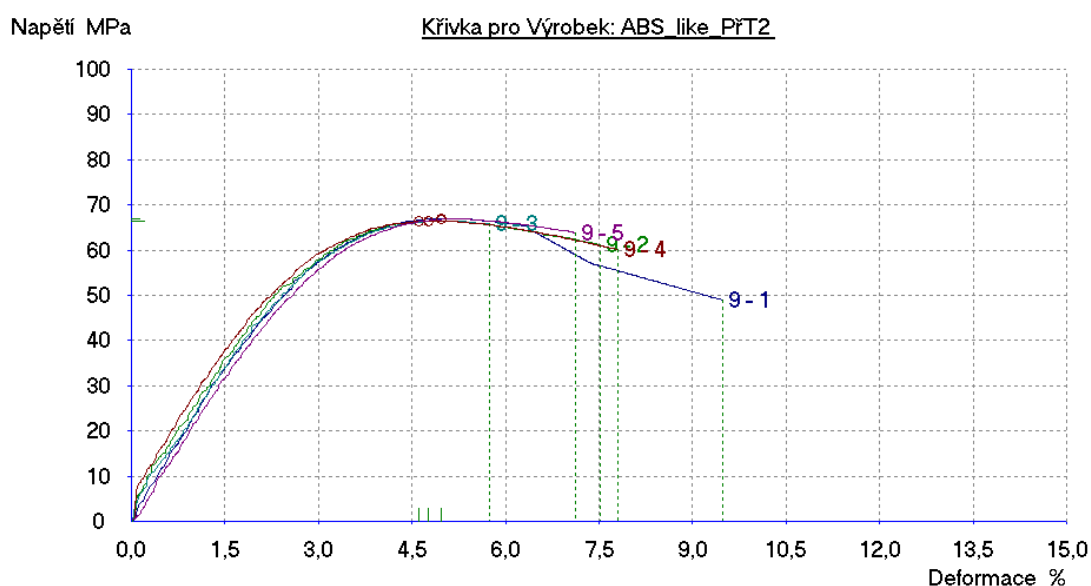


Graf. 8 Pracovní diagram zkoušky tahem po teplotaci 2

Tab. 8 Výsledné hodnoty zkoušky tahem po teplotaci 2

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu,[MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2 872,00	71,80	3700	4,66	7,42	66,60	2 664,00
2	2 876,00	71,90	4205	4,43	7,92	64,30	2 572,00
3	2 860,00	71,50	4350	4,82	7,70	64,90	2 596,00
4	2 860,00	71,50	5938	4,61	11,26	56,50	2 260,00
5	2 872,00	71,80	1077	5,18	8,93	61,80	2 472,00
Rozmezi	2860,00- 2 876,00	71,50- 71,90	1077- 5938	4,43- 5,18	7,42- 11,26	56,50- 66,60	2260,00- 2 664,00
Stř.hodn.± směr.odch.	2868,00± 7,48	71,70± 0,19	3854± 1764	4,74± 0,28	8,65± 1,57	62,82± 3,93	2512,80± 157,21

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných kolmo na směr jízdy tiskové hlavy
tiskárny OBJET Connex 500 a vystavených teplotaci 2**

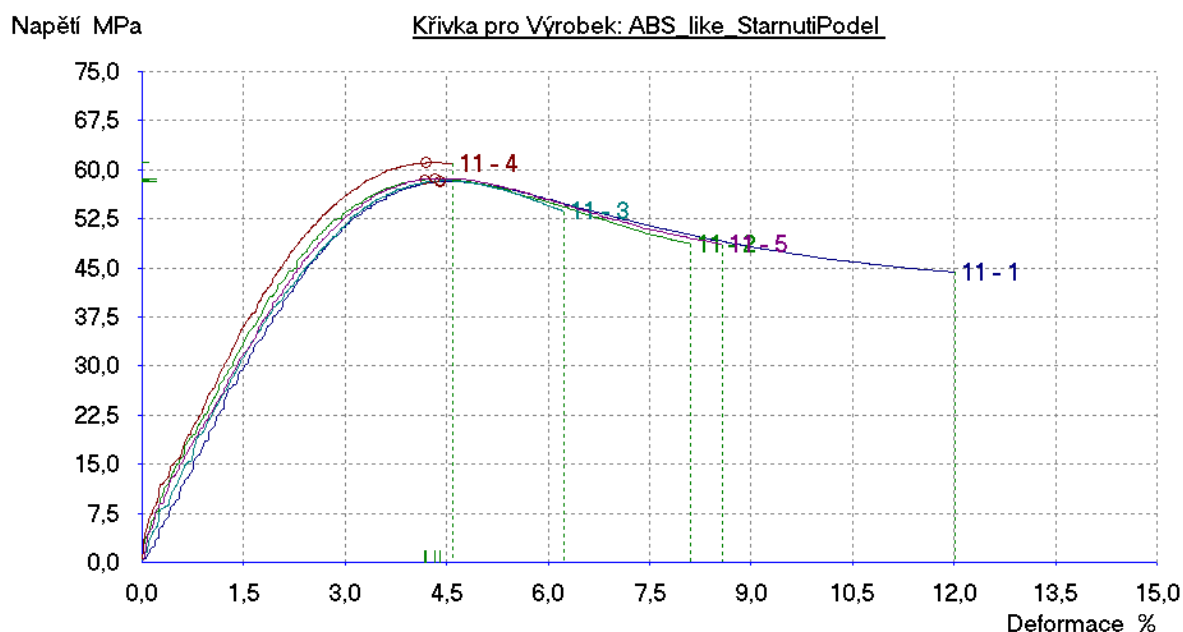


Graf. 9 Pracovní diagram zkoušky tahem po teplotaci 2

Tab. 9 Výsledné hodnoty zkoušky tahem po teplotaci 2

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu,[MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2 680,00	67,00	2850	4,97	9,48	48,90	1 956,00
2	2 660,00	66,50	4103	4,76	7,51	61,20	2 448,00
3	2 656,00	66,40	2821	4,77	5,74	65,80	2 632,00
4	2 656,00	66,40	5400	4,61	7,80	60,10	2 404,00
5	2 672,00	66,80	2050	4,97	7,12	63,80	2 552,00
Rozmezí	2656,00- 2 680,00	66,40- 67,00	2050- 5400	4,61- 4,97	5,74- 9,48	48,90- 65,80	1956,00- 2 632,00
Stř.hodn.± směr.odch.	2664,80± 10,73	66,62± 0,27	3445± 1318	4,81± 0,15	7,53± 1,34	59,96± 6,57	2398,40± 262,86

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných podélně ve směru jízdy tiskové hlavy
tiskárny OBJET Connex 500 a vystavených procesu stárnutí**

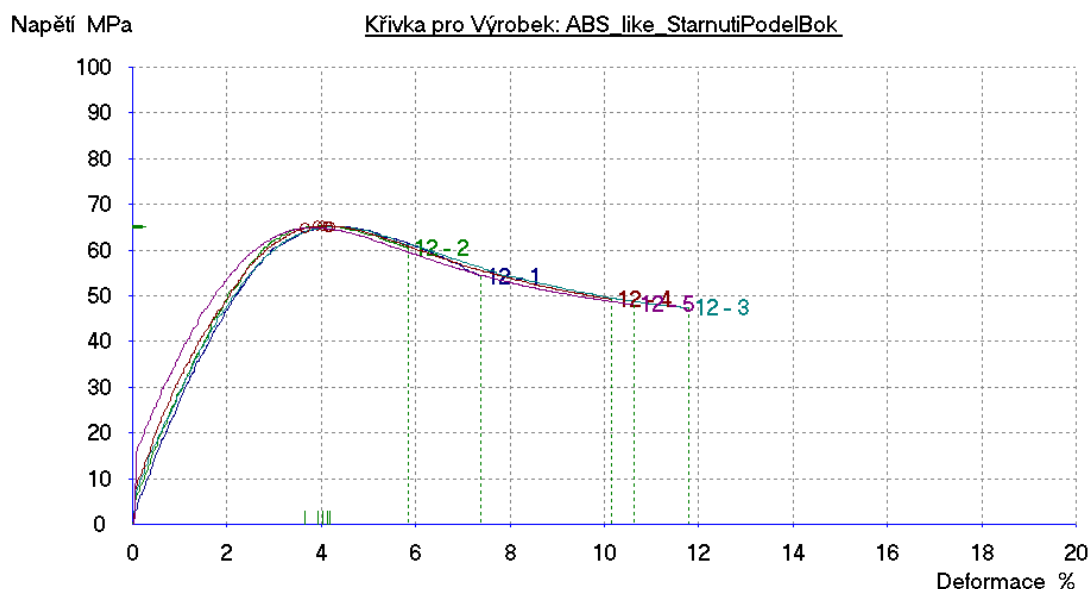


Graf. 10 Pracovní diagram zkoušky tahem po procesu stárnutí

Tab. 10 Výsledné hodnoty zkoušky tahem po procesu stárnutí

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu, [MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2327,50	58,19	1635	4,39	12,02	44,31	1 772,50
2	2340,00	58,50	2308	4,17	8,10	48,63	1 945,00
3	2332,50	58,31	3031	4,40	6,24	53,56	2 142,50
4	2442,50	61,06	3250	4,19	4,60	60,88	2 435,00
5	2347,50	58,69	3526	4,32	8,58	48,50	1 940,00
Rozmezí	2327,50- 2442,50	58,19- 61,06	1635- 3526	4,17- 4,40	4,60- 12,02	44,31- 60,88	1772,50- 2 435,00
Stř.hodn.± směr.odch.	2358,00± 47,84	58,95± 1,20	2750± 770	4,30± 0,11	7,91± 2,79	51,18± 6,34	2047,00± 253,41

Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných na bok podélně ve směru jízdy tiskové hlavy tiskárny OBJET Connex 500 a vystavených procesu stárnutí

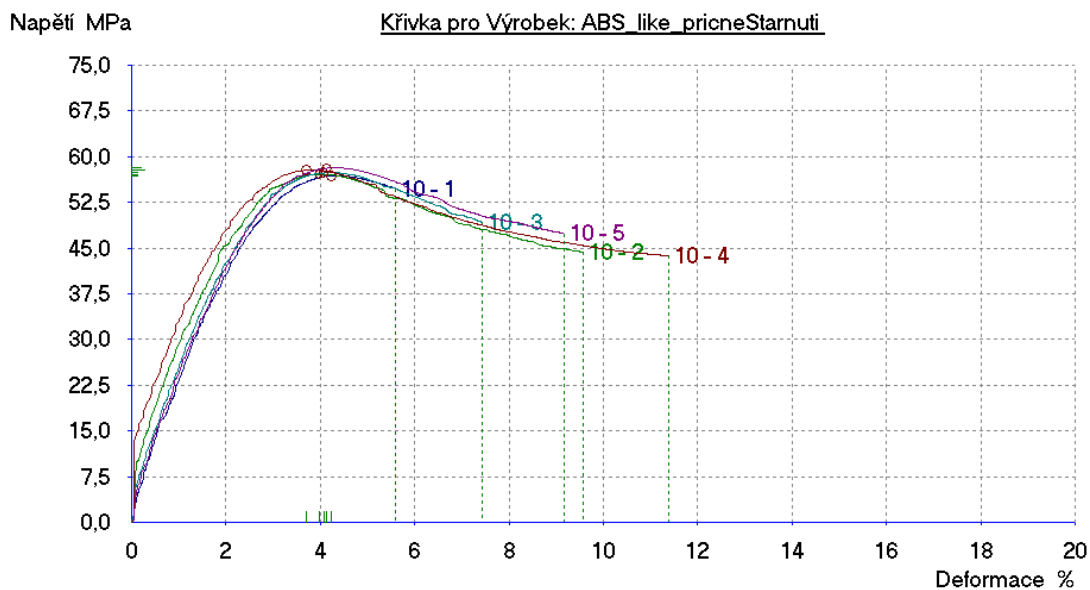


Graf. 11 Pracovní diagram zkoušky tahem po procesu stárnutí

Tab. 11 Výsledné hodnoty zkoušky tahem po procesu stárnutí

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu, [MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2 604,00	65,10	3100	4,14	7,38	54,20	2 168,00
2	2 612,00	65,30	2800	3,92	5,84	60,40	2 416,00
3	2 604,00	65,10	3100	4,18	11,80	47,30	1 892,00
4	2 612,00	65,30	4154	4,02	10,14	49,20	1 968,00
5	2 596,00	64,90	9385	3,66	10,64	48,00	1 920,00
Rozmezí	2596,00- 2 612,00	64,90- 65,30	2800- 9385	3,66- 4,18	5,84- 11,80	47,30- 60,40	1892,00- 2 416,00
Stř.hodn.± směr.odch.	2605,60± 6,69	65,14± 0,17	4508± 2775	3,98± 0,21	9,16± 2,46	51,82± 5,50	2072,80± 220,15

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných kolmo na směr jízdy tiskové hlavy
tiskárny OBJET Connex 500 a vystavených procesu stárnutí**



Graf. 12 Pracovní diagram zkoušky tahem po procesu stárnutí

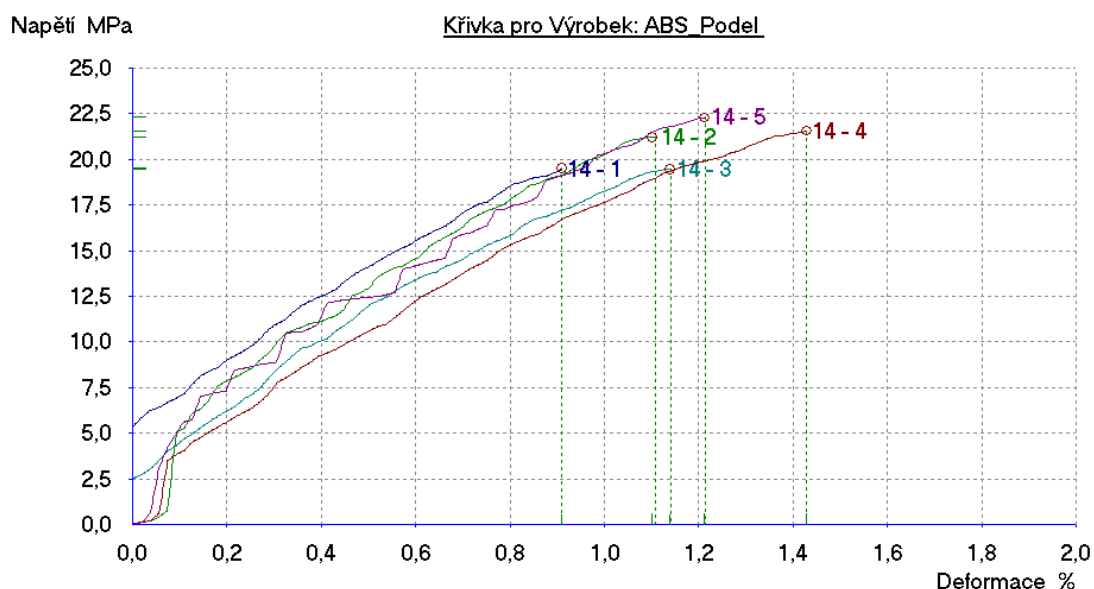
Tab. 12 Výsledné hodnoty zkoušky tahem po procesu stárnutí

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu,[MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	2 275,00	56,88	2781	4,23	5,60	54,75	2 190,00
2	2 285,00	57,13	6063	3,97	9,56	44,31	1 772,50
3	2 295,00	57,38	4188	4,07	7,42	49,31	1 972,50
4	2 312,50	57,81	8281	3,70	11,38	43,69	1 747,50
5	2 325,00	58,13	4167	4,14	9,18	47,31	1 892,50
Rozmezí	2275,00- 2 325,00	56,88- 58,13	2781- 8281	3,70- 4,23	5,60- 11,38	43,69- 54,75	1747,50- 2 190,00
Stř.hodn.± směr.odch.	2298,50± 20,28	57,46± 0,51	5096± 2129	4,02± 0,20	8,63± 2,20	47,88± 4,47	1915,00± 178,75

Příloha 2. Výsledná data ze zkoušky tahem těles, vytištěných na tiskárně

Dimension SST 768

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných podélně na plochu ve směru jízdy
tiskové hlavy tiskárny Dimension SST 768**

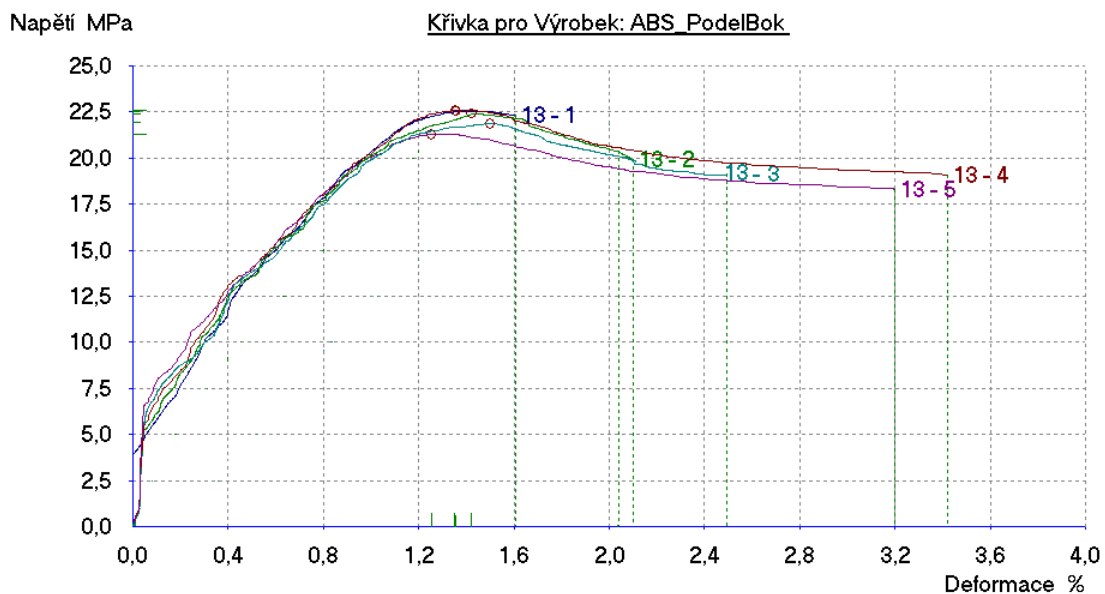


Graf. 13 Pracovní diagram zkoušky tahem

Tab. 13 Výsledné hodnoty zkoušky tahem

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu,[MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	780,33	19,51	2 633	0,91	0,91	19,51	780,33
2	849,67	21,24	4 089	1,10	1,11	21,24	849,67
3	779,33	19,48	1 861	1,14	1,14	19,48	779,33
4	863,00	21,58	2 934	1,43	1,43	21,58	863,00
5	892,00	22,30	3 189	1,21	1,21	22,30	892,00
Rozmezí	779,33- 892,00	19,48- 22,30	1 861- 4 089	0,91- 1,43	0,91- 1,43	19,48- 22,30	779,33- 892,00
Stř.hodn.± směr.odch.	832,87± 50,78	20,82± 1,27	2 941± 813	1,16± 0,19	1,16± 0,19	20,82± 1,27	832,87± 50,78

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných podélně na bok ve směru jízdy tiskové
hlavy tiskárny Dimension SST 768**

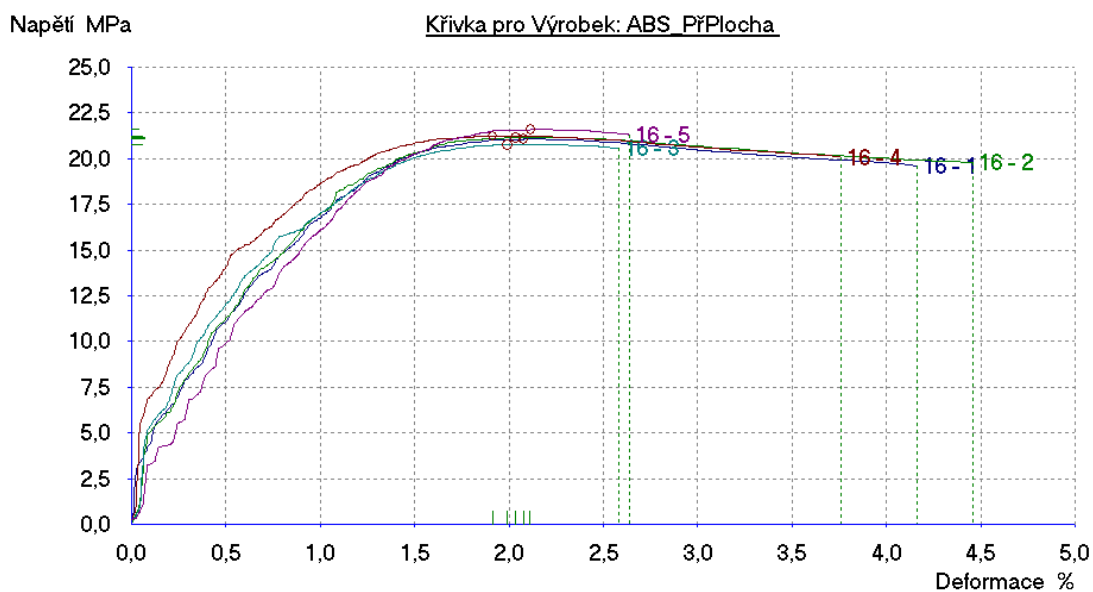


Graf. 14 Pracovní diagram zkoušky tahem

Tab. 14 Výsledné hodnoty zkoušky tahem

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu,[MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	902,33	22,56	1929	1,36	1,61	22,31	892,41
2	897,00	22,42	2827	1,42	2,10	19,90	796,00
3	877,00	21,92	2377	2,04	2,04	21,92	877,00
4	904,00	22,60	2113	1,35	3,42	19,08	763,00
5	852,00	21,30	2000	1,25	3,20	18,33	733,00
Rozmezí	852,00- 904,00	21,30- 22,60	1929- 2827	1,25- 2,04	1,61- 3,42	18,33- 22,31	733,00- 892,41
Stř.hodn.± směr.odch.	886,47± 22,07	22,16± 0,55	2249± 365	1,48± 0,32	2,47± 0,79	20,31± 1,75	812,28± 69,98

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných na plochu kolmo na směr jízdy tiskové
hlavy tiskárny Dimension SST 768**

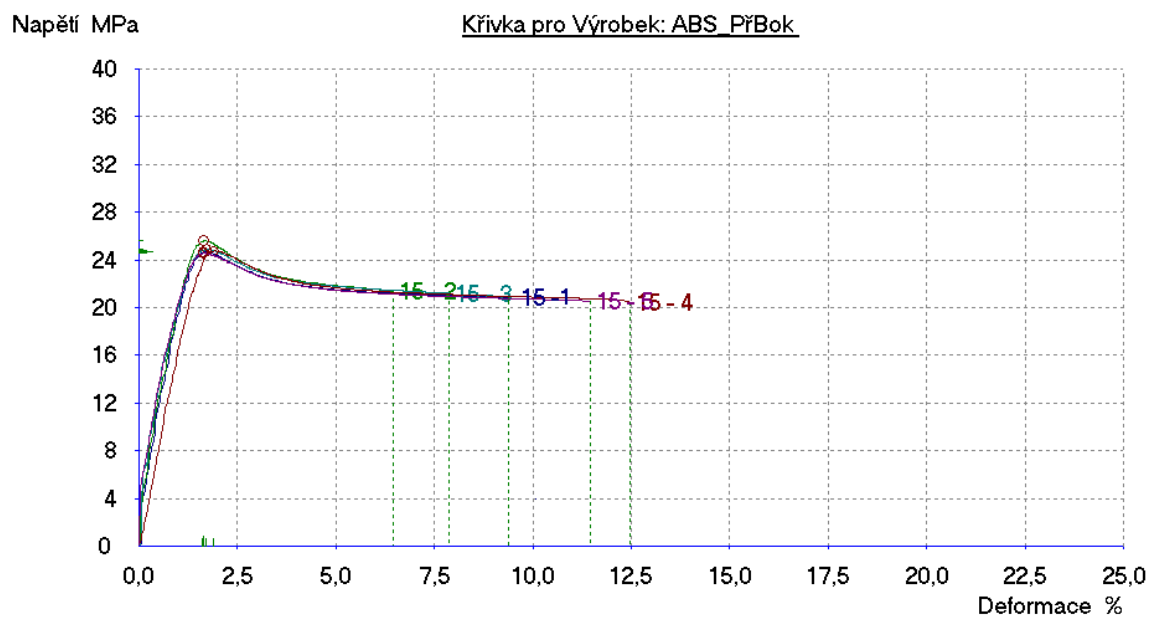


Graf. 15 Pracovní diagram zkoušky tahem

Tab. 15 Výsledné hodnoty zkoušky tahem

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz, [%]	Napětí ve zlomu,[MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	843,00	21,08	2800	2,08	4,16	19,60	784,00
2	847,00	21,17	2800	2,04	4,46	19,77	791,00
3	831,00	20,77	3025	1,99	2,58	20,58	823,00
4	850,00	21,25	2200	1,91	3,76	20,08	803,00
5	864,00	21,60	2313	2,11	2,64	21,30	852,00
Rozmezí	831,00- 864,00	20,77- 21,60	2200- 3025	1,91- 2,11	2,58- 4,46	19,60- 21,30	784,00- 852,00
Stř.hodn.± směr.odch.	847,00± 11,94	21,18± 0,30	2628± 353	2,03± 0,08	3,52± 0,87	20,27± 0,69	810,60± 27,46

**Zkouška tahem zkušební tyčí, vytištěných na bok kolmo na směr jízdy tiskové
hlavy tiskárny Dimension SST 768**



Graf. 16 Pracovní diagram zkoušky tahem

Tab. 16 Výsledné hodnoty zkoušky tahem

Pořadí	F_{\max} , [N]	R_m , [MPa]	E , [MPa]	A_v max, [%]	A extenz., [%]	Napětí ve zlomu,[MPa]	Síla ve zlomu, [N]
1	987,00	24,67	3213	1,63	10,27	21,03	851,00
2	1 023,75	25,59	2344	1,63	6,46	21,31	852,50
3	995,00	24,88	4300	1,71	7,88	21,17	847,00
4	990,00	24,75	1603	1,89	12,48	20,42	817,00
5	982,00	24,55	1641	1,62	11,46	20,48	819,00
Rozmezí	982,00 - 1023,75	24,55- 25,59	1603- 4300	1,62- 1,89	6,46- 11,46	20,42- 21,31	817,00- 852,50
Stř.hodn.± směr.odch.	995,55± 16,45	24,89± 0,41	2249± 365	1,70± 0,11	9,71± 2,50	20,88± 0,41	837,30± 17,75